

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Vjekoslav Krleža

Zagreb, 2012.

Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:

Prof.dr.sc. Željko Šitum

Vjekoslav Krleža

Zagreb, 2012.

IZJAVA

Pod punom moralnom odgovornošću izjavljujem da sam završni rad na temu „Projektiranje neizrazitog regulatora i primjena u regulaciji hidrauličkih sustava“ izradio samostalno koristeći se navedenom literaturom i znanjem stečenim tijekom studija.

ZAHVALA

Zahvaljujem se svojoj obitelji na moralnoj i financijskoj podršci, razumijevanju, strpljenju i povjerenju koje su mi pružili tijekom preddiplomskog studija i za vrijeme izrade završnog rada. Zahvaljujem se voditelju rada, Prof.dr.sc. Željku Šitumu što mi je omogućio izradu završnog rada, zahvaljujem mu na kvalitetnoj i stručnoj pomoći, odvojenom vremenu, strpljenju i korisnim savjetima. Također mu zahvaljujem na savjetima i pomoći pri pronalasku odgovarajuće literature.

Sadržaj:

Sadržaj:	5
1 UVOD	1
2 ELEKTROHIDRAULIČKI SERVOSUSTAV	2
2.1 Eksperimentalni model.....	3
2.2 Proporcionalni razvodnik.....	5
2.3 Nelinearni matematički model sustava.....	7
2.3.1 Model proporcionalnog razvodnika	8
2.3.2 Model hidrauličkog cilindra	10
2.3.2 Dinamika elektrohidrauličkog servosustava	12
3 NEIZRAZITA LOGIKA	15
3.1 Povijest	15
3.2 Osnove neizrazite logike	16
3.3 Neizrazito upravljanje u regulacijskim sustavima	19
3.3.1 Sinteza neizrazitog PD regulatora.....	20
3.3.2 Struktura neizrazitog PD regulatora	24
4 SIMULACIJA SUSTAVA	26
4.1 Simulacijski model sustava	27
4.1.1 Izrada simulacijskog modela	27
4.1.2 Parametri sustava	32
4.2 Simulacije izvedene standardnim PD regulatorom	33
4.3 Simulacije izvedene neizrazitim regulatorima.....	36

5	EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE.....	43
5.1	Opis eksperimentalnog uređaja.....	43
5.2	Komponente eksperimentalnog uređaja.....	45
5.3	Rezultati eksperimentalnog ispitivanja.....	47
6	ZAKLJUČAK.....	54
	Literatura:	56

Popis slika:

Slika 2.1 Funkcionalna blok shema sustava.....	3
Slika 2.2 Simbolički prikaz elektrohidrauličkog servosustava.....	4
Slika 2.3 Pojednostavljeni princip rada proporcionalnog razvodnika.....	5
Slika 2.4 Konstrukcija proporcionalnog razvodnika.....	6
Slika 2.5 Linearizirani model elektrohidrauličkog servosustava.....	14
Slika 3.1 Funkcija pripadnosti kod primjene izrazite logike.....	18
Slika 3.2 Funkcija pripadnosti kod primjene neizrazite logike.....	18
Slika 3.3 Nadogradnja neizrazitog upravljanja na postojeća rješenja.....	20
Slika 3.4 Općenita struktura neizrazitog regulatora.....	21
Slika 3.5 Različiti oblici zapisa baze pravila neizrazitog regulatora.....	22
Slika 3.6 Matrica baze pravila neizrazitog regulatora.....	23
Slika 3.7 Lista naredbi neizrazitog regulatora.....	23
Slika 3.8 Struktura neizrazitog PD regulatora.....	25
Slika 4.1 Blok shema jednadžbe protoka kroz proporcionalni ventil.....	27
Slika 4.2 Blok shema promjena tlakova u sustavu.....	28
Slika 4.2 Blok shema promjena tlakova u sustavu.....	29
Slika 4.4 Blok shema nelinearnog sustava elektrohidrauličkog servosustava.....	30
Slika 4.5 Model za simulaciju elektrohidrauličkog servosustava.....	31
Slika 4.6 Parametri eksperimentalne opreme.....	32
Slika 4.7 Vrijednosti parametara nelinearnog modela sustava.....	32
Slika 4.8 Pomak i brzina klipa cilindra u ovisnosti o vremenu.....	33
Slika 4.9 Pomak klipa proporcionalnog ventila i napon u ovisnosti o vremenu.....	34
Slika 4.10 Karakteristika protoka kroz proporcionalni ventil u ovisnosti o vremenu.....	34

Slika 4.11 Karakteristika tlakova u ovisnosti o vremenu.....	35
Slika 4.12 Funkcije pripadnosti i površina linearnog <i>Sugeno</i> regulatora.....	36
Slika 4.13 Dijagram pomak-vrijeme dobiven linearnim <i>Sugeno</i> regulatorom.....	36
Slika 4.14 Funkcije pripadnosti i površina <i>Sugeno</i> regulatora.....	37
Slika 4.15 Dijagram pomak-vrijeme dobiven <i>Sugeno</i> regulatorom.....	38
Slika 4.16 Funkcije pripadnosti i površina <i>Sugeno</i> regulatora.....	39
Slika 4.17 Dijagram pomak-vrijeme dobiven <i>Sugeno</i> regulatorom.....	39
Slika 4.18 Funkcije pripadnosti i površina <i>Sugeno</i> regulatora.....	40
Slika 4.19 Dijagram pomak-vrijeme dobiven <i>Sugeno</i> regulatorom.....	40
Slika 4.20 Funkcije pripadnosti i površina <i>Sugeno</i> regulatora.....	41
Slika 4.21 Dijagram pomak-vrijeme dobiven <i>Sugeno</i> regulatorom.....	41
Slika 4.22 Funkcije pripadnosti i površina <i>Mamdani</i> regulatora.....	42
Slika 4.23 Dijagram pomak-vrijeme dobiven <i>Mamdani</i> regulatorom.....	42
Slika 5.1 Fotografija eksperimentalnog uređaja.....	44
Slika 5.2 Simulink shema za eksperimentalno ispitivanje.....	48
Slika 5.3 Dijagramski prikaz pomaka, tlaka i upravljačkog signala u ovisnosti o vremenu.....	49
Slika 5.4 Dijagramski prikaz položaja, tlaka i upravljačkog signala u ovisnosti o vremenu.....	51
Slika 5.5 Dijagramski prikaz smjera opterećenja cilindra	51
Slika 5.6 Dijagramski prikaz položaja, tlaka i upravljačkog signala u ovisnosti o vremenu.....	51
Slika 5.7 Dijagramski prikaz položaja u ovisnosti o vremenu.....	51

Slika 5.8 Dijagramski prikaz položaja, tlaka i upravljačkog signala u ovisnosti o vremenu.....	52
Slika 5.9 Dijagramski prikaz položaja u ovisnosti o vremenu.....	52
Slika 5.10 Dijagramski prikaz položaja, tlaka i upravljačkog signala u ovisnosti o vremenu.....	53
Slika 5.11 Dijagramski prikaz položaja u ovisnosti o vremenu.....	55

Popis oznaka:

A_1 , [m²] - površina klipa na strani gdje nema klipnjače

A_2 , [m²] - površina klipa na strani klipnjače

A_p , [m²] - radna površina klipa

B , [Pa] - bodul stlačivosti ulja

b , [Ns/m] - koeficijent viskoznog trenja cilindra

c , [N/m] - koeficijent elastičnosti tereta

d - vremenska konstanta kašnjenja sankcija

D_c , [m] - promjer klipa cilindra

d_c , [m] - promjer klipnjače cilindra

d_e - derivacija pogreške regulacije

d_v , [m] - promjer klipa proporcionalnog razvodnika

e - pogreška regulacije

$G(s)$ - prijenosna funkcija

G_p - koeficijent učenja

i , [A] - električna struja

K_{de} - faktor pojačanja derivacije regulacijskog odstupanja

K_e - faktor pojačanja regulacijskog odstupanja

K_m , [V/m] - koeficijent pojačanja mjernog sustava

K_q , [(m³/s)/A] - koeficijent pojačanja protoka proporcionalnog razvodnika

K_R , [A/V] - pojačanje regulatora

K_u - faktor pojačanja izlaza neizrazitog regulatora

K_v , [m/mA] - koeficijent pojačanja proporcionalnog razvodnika

l , [m] - hod klipa cilindra

M , [kg] - masa tereta

M_0 , [kg] - masa klipa i klipnjače

n - trenutak uzorkovanja

p , [Pa] - tlak

p_a , [Pa] - tlak rezervoara

p_s , [Pa] - tlak napajanja

p_L , [Pa] - tlak opterećenja

Q , [m³/s] - protok

Q_L , [m³/s] - protok fluida kroz razvodnik

s - Laplace-ov operator

t , [s] - vrijeme

u , [V] - električni napon

v , [m/s] - brzina gibanja klipa cilindra

V , [m³] - volumen

V_0 , [m³] - poluvolumen cilindra

V_t , [m³] - ukupni radni volumen fluida pod tlakom

x - element skupa

x_i - iznos stupnja pripadnosti neizrazitom skupu

x_m - izrazita vrijednost dobivena na temelju mjerenja procesnih veličina

x_p , [m] - pomak klipa cilindra

x_R , [m] - referentna veličina

y_v , [m] - pomak klipa proporcionalnog odstupanja ventila

μ - funkcija pripadnosti

ρ , [kg/m³] - gustoća radnog fluida

ζ_h - faktor prigušenja hidrauličkog cilindra

ζ_v - faktor prigušenja proporcionalnog ventila

ω_h , [rad/s] - neprigušena vlastita frekvencija hidrauličkog cilindra

ω_v , [rad/s] - neprigušena vlastita frekvencija proporcionalnog ventila

Sažetak

Tema ovog završnog rada je regulacija položaja elektrohidrauličkog servosustava primjenom neizrazitog (*fuzzy*) regulatora. Elektrohidraulički servosustavi često su primjenjivani u različitim granama industrije, osobito u procesima gdje se pojavljuju velika opterećenja, odnosno gdje je potrebno ostvariti velike sile. Velika prednost elektrohidrauličkih servosustava je što su komponente sustava vrlo malih dimenzija, brze i precizne u odnosu na velike sile koje se njima mogu realizirati. Unatoč svim svojim prednostima, elektrohidraulički servosustavi vrlo su komplicirani i zadaju velike probleme kada je riječ o regulaciji. Problem je u nelinearnom dinamičkom ponašanju hidrauličkog dijela sustava što ga uzrokuju prije svega trenje i stlačivost radnog fluida. Takav sustav vrlo je teško regulirati standardnim načinima regulacije, teško je i određivanje matematičkog modela i brojnih parametara sustava. Upravo iz tog razloga primjenjuju se drugačiji pristupi regulaciji, a jedan od njih je i neizrazita logika (*fuzzy*). U ovome radu opisan je elektrohidraulički servosustav i napravljen je matematički model sustava. Također su opisane teorijske osnove neizrazite logike te projektiranje neizrazitih regulatora. Napravljene su simulacije i prikazani su rezultati sustava u programskom alatu *Simulink/Matlab*, najprije za standardni PD regulator, a zatim za više tipova neizrazitih (*fuzzy*) regulatora. Nakon prikaza rezultata simulacije, prikazani su i rezultati dobiveni eksperimentalnim ispitivanjem koje se provodilo u laboratoriju na eksperimentalnom uređaju „HK-HA 7“. Uspoređeni su rezultati eksperimenata i simulacija regulacije elektrohidrauličkog sustava standardnim PD regulatorom i regulacije neizrazitim (*fuzzy*) regulatorom.

Ključne riječi: Elektrohidraulički servosustav, fuzzy, neizrazita logika, neizraziti regulator, regulacija položaja

1 UVOD

Elektrohidraulički servosustavi su sustavi koji se sastoje od elektroničkih i hidrauličkih elemenata integriranih u cjelinu. Takvi sustavi imaju znatne prednosti u odnosu na hidrauličke i električne sustave zasebno. Elektrohidraulički servosustavi puno su bolji u odnosu na klasičnu hidrauliku kada je riječ o upravljanju sustava jer su upravljački signali električni, što je pogodno za prijenos, spremanje, pretvorbu i obradu, dok je sa hidrauličkim upravljačkim signalima sasvim suprotno. Kada uspoređujemo električne i hidrauličke aktuatore jednakih snaga, možemo vidjeti da su hidrauličke komponente znatno manje, što elektrohidrauličke servosustave čini idealnima za primjenu u procesima gdje se traže velike snage, a ujedno i velika preciznost pozicioniranja, kao i brzina.

Servosustav je vrsta sustava za automatsko upravljanje kod kojega izlazna veličina slijedi zakonitosti promjene ulazne veličine. Servomehanizam je servosustav koji na izlazu ima kinematičku veličinu kao kutni ili translacijski pomak ili kutnu ili translacijsku brzinu. Pojam servohidraulika našao je čvrsto utočište u tehničkom jeziku. On obuhvaća sve vrste primjene hidraulike u regulacijskim krugovima. Elektrohidraulički servosustavi su servomehanizmi koji omogućuju da se velikim inercijskim teretima upravlja uz visoku točnost upravljanja, veliku brzinu odziva i velika pojačanja snage. Pod teretom podrazumjeva se objekt upravljanja koji troši snagu. Ovakvom upravljanju najviše je doprinio razvoj elektronike, odnosno razvoj elektrohidrauličkih razvodnika koji su ujedno i osnovne komponente elektrohidrauličkih servosustava. Elektrohidraulički razvodnici za regulaciju mogu se klasificirati na servoventile i proporcionalne ventile. Prvo je uslijedio razvoj servoventila i to na području zrakoplovstva. Elektrohidraulički servoventili su razvijeni da bi se električnim signalom male vrijednosti moglo točno upravljati velikim reakcijskim silama na krilima letećih objekata. S vremenom se i industrija počela razvijati i promjenjivati ovu vrlo skupu tehniku, te je došlo do razvoja proporcionalnih ventila. Za proporcionalne ventile se kaže da popunjavaju prazninu između klasične hidraulike i servohidraulike. Proporcionalni ventili objedinjuju prednosti hidraulike s prednostima koje daje elektronika. Servoventili za povezivanje električnog i hidrauličkog dijela sustava koriste elektromehanički pretvarač, dok proporcionalni ventili koriste proporcionalne magnete. Elektrohidraulički servosustavi od velikog su značaja u raznim granama industrije, a u ovom radu prikazana je regulacija takvog sustava pomoću klasičnog i neizrazitog (*fuzzy*) regulatora.

2 ELEKTROHIDRAULIČKI SERVOSUSTAV

Elektrohidraulički sustavi općenito služe za upravljanje procesa u kojima su nam potrebne velike sile, a ujedno i velika točnost pozicioniranja i velika brzina odziva.

Elektrohidrauličke sustave možemo podijeliti na:

- sustave s on-off elektromagnetima,
- sustave s proporcionalnim elektromagnetima,
- elektrohidrauličke servosustave.

U ovome radu za regulaciju pozicije korišteni su elektrohidraulički servosustavi.

Elektrohidrauličke servosustave možemo podijeliti na dva osnovna dijela:

- upravljački (elektronički - informacijski),
- izvršni (energetski - hidraulički).

Elektronički dio elektrohidrauličkih servosustava koristi se za slijedno upravljanje hidrauličkim dijelom sustava, a hidraulički dio omogućuje pretvorbu hidrauličke energije u mehaničku energiju. Izvršne elemente (aktuatora) elektrohidrauličkog servosustava moguće je klasificirati prema vrsti ostvarenog gibanja. Hidraulički aktuatori za ostvarivanje rotacijskog gibanja su hidraulički motori, a za dobivanje translacijskog gibanja koriste se hidraulički cilindri, zbog čega ih se naziva i linearnim motorima. Zbog svoje primitivne konstrukcije i jednostavnog ostvarivanja translacijskog gibanja, hidraulički cilindri postaju standardne komponente mnogih strojeva i uređaja. Primjerice, hidraulički cilindri uslijed velikog omjera snage i mase postaju neizostavni dijelovi uređaja za ispitivanje mehaničkih svojstava materijala. [1]

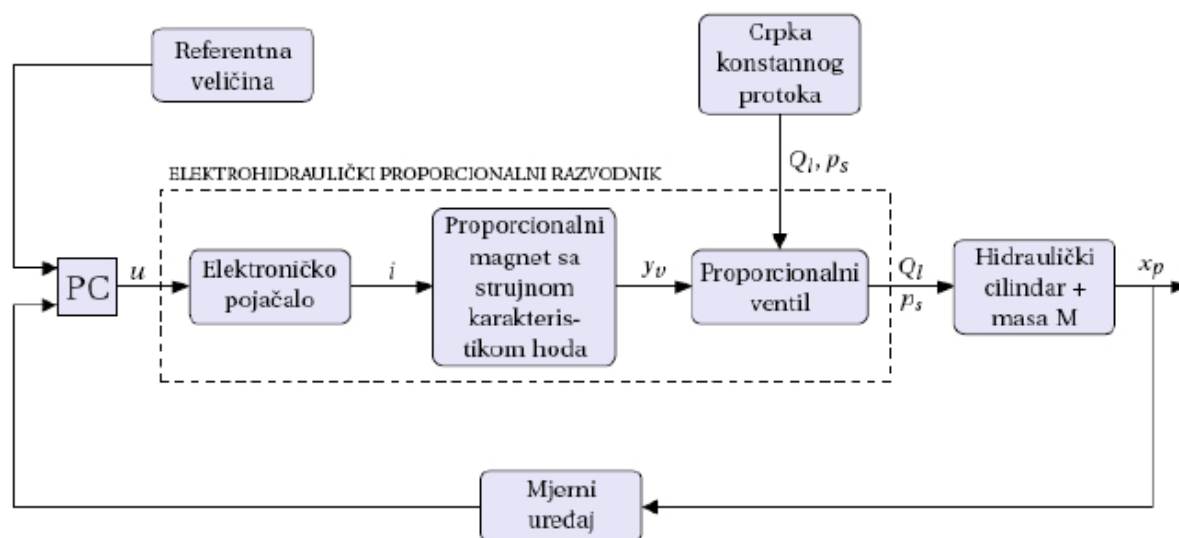
Upravljanje hidrauličkim aktuatorima klasificira se na dvije temeljne izvedbe:

- hidraulički aktuator upravljan servorazvodnikom,
- hidraulički aktuator upravljan servocrpkom.

2.1 Eksperimentalni model

Sustav koji je razmatran u ovom radu je izvedba elektrohidrauličkog servosustava sa hidrauličkim aktuatorom upravljanim proporcionalnim razvodnikom. Kao hidraulički aktuator korišten je hidraulički cilindar.

Na slici 2.1 je prikazana funkcionalna shema elektrohidrauličkog servosustava.

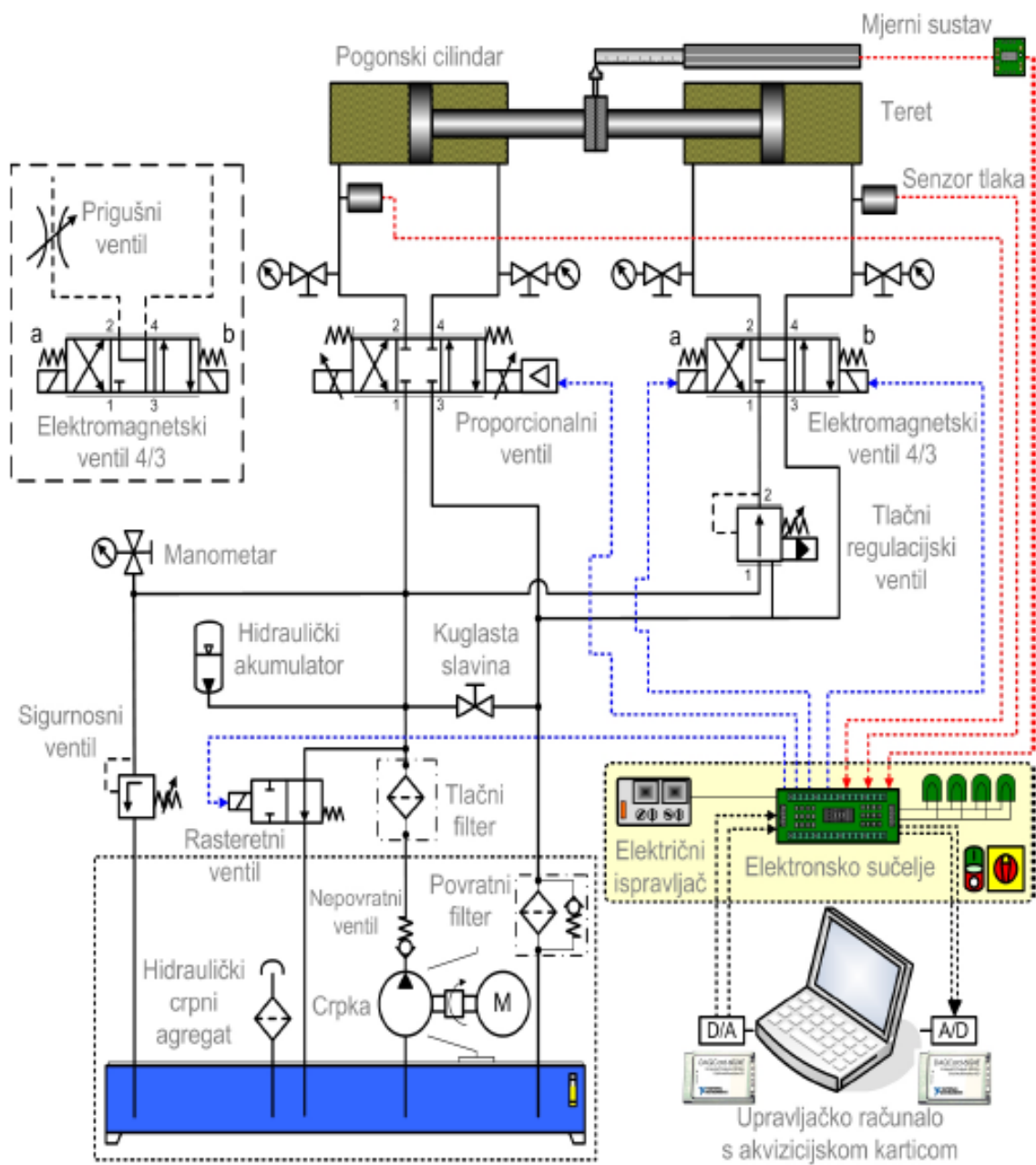


Slika 2.1 Funkcionalna blok shema sustava

Na slici 2.1 možemo vidjeti elektrohidraulički servosustav prikazan blok shemom u obliku regulacijskog kruga. Na eksperimentalnom sustavu koji je razmatran u ovome radu, ulazni signal (referentna vrijednost) i mjerni signal iz procesa uspoređuju se u računalu, gdje računalu ujedno ima i ulogu regulatora. Mjerni signal predstavlja položaj klipa hidrauličkog cilindra x , koji se očitava pomoću linearnog enkodera (potenciometra), a u računalu se šalje putem pripadajuće upravljačke kartice koja je ujedno i elektroničko pojačalo. Objekt regulacije ovog regulacijskog kruga je hidraulički cilindar opterećen teretom M , koji se ostvaruje drugim hidrauličkim cilindrom.

Na slici 2.2 predstavljen je simbolički prikaz elektrohidrauličkog servosustava.

Detaljniji opis eksperimentalnog sustava napravljen je u **poglavlju 6**.

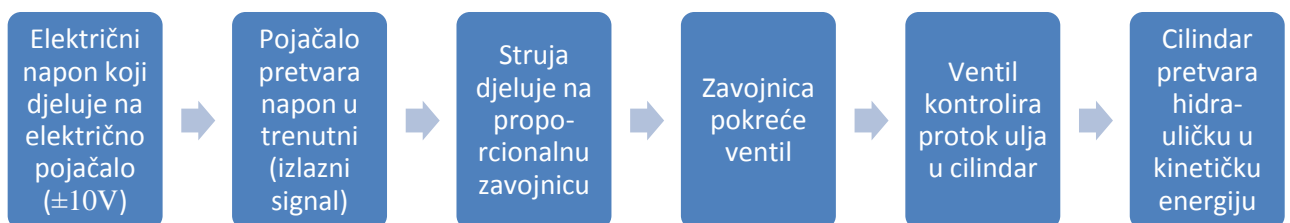


Slika 2.2 Simbolički prikaz elektrohidrauličkog servosustava

2.2 Proporcionalni razvodnik

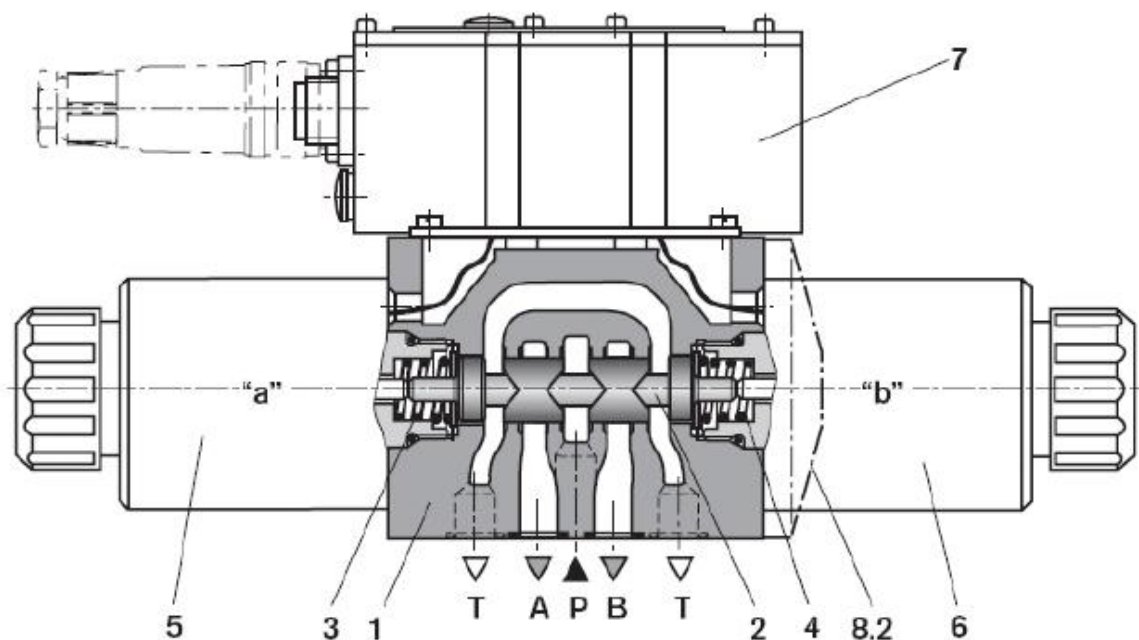
Elektrohidraulički proporcionalni razvodnik predstavlja osnovnu upravljačku komponentu koja omogućuje povezivanje elektroničkog s hidrauličkim djelom sustava. Zbog toga je za razumijevanje rada proporcionalnog razvodnika potrebno poznavanje električnih i magnetskih pojava koje su u njemu prisutne, kao i zakona mehanike i hidraulike. Elektrohidraulički proporcionalni razvodnik sadrži elektroničko pojačalo i proporcionalni magnet sa strujnom karakteristikom hoda. Elektrohidraulički proporcionalni razvodnik upravlja protokom Q_I kojeg daje crpka pod tlakom p_s , te na taj način djeluje na hidraulički cilindar opterećen masom M . Kod proporcionalnog razvodnika električki se signal kao napon (najčešće između $\pm 10V$) pretvara u elektroničkom pojačalu, razmjerno visini napona, u električnu struju. Proporcionalno električkoj struji kao ulaznoj veličini proporcionalni magnet proizvodi izlaznu veličinu: silu i hod. Ove veličine, sila odnosno hod, kao ulazni signal za hidraulički ventil znače proporcionalno tom signalu jedan određeni protok ili tlak. [2]

Pojednostavljeni princip rada proporcionalnog razvodnika prikazan je na slici 2.3:



Slika 2.3 Pojednostavljeni princip rada proporcionalnog razvodnika

Slika 2.4 prikazuje konstrukciju proporcionalnog razvodnika na kojoj se u presjeku vide sastavni dijelovi razvodnika, kao i kanali kojima protiče radni medij. Sastavni dijelovi proporcionalnog ventila su kućište (1), dva proporcionalna magneta (5,6) sa analognom strujnom karakteristikom hoda, razvodni klip (2) i dvije opruge za centriranje (3,4). Ako magneti nisu aktivirani, razvodni klip se pomoću opruga drži u srednjem položaju. Aktiviranje razvodnog klipa vrši se direktno preko proporcionalnog magneta. Kod razvodnog klipa prikazanog na slici 2.4 zatvorena je veza između *P*, *A*, *B* i *T* kanala. Ako se pobudi magnet „a“ (lijevo) on će pomaknuti razvodni klip u desno. U tom slučaju ostvaruje se veza između *P* i *B*, te *A* i *T* kanala. Razvodni klip će se pomicati više u desno što je jači signal koji dolazi od električkog upravljanja. Hod je dakle proporcionalan električkom signalu. [3]



Slika 2.4 Konstrukcija proporcionalnog razvodnika

2.3 Nelinearni matematički model sustava

Linearni vremenski invarijantni sustavi opisuju se linearnim diferencijalnim jednažbama s konstantnim koeficijentima. Teorija tih sustava veoma je razrađena, a karakteristična je po sasvim poopćenim postupcima. Prema načelu superpozicije uvedena je prijenosna funkcija pomoću koje možemo identificirati pojedine sklopove kao i cijeli sustav neovisno o amplitudi i obliku ulaznog signala.

Kod linearnih vremenski varijantnih sustava imamo linearne diferencijalne jednažbe s promjenljivim koeficijentima koji su funkcije vremena. Kod njih također vrijedi načelo superpozicije, jer ne dolazi do međudjelovanja dvaju nezavisnih pobudnih signala. Međutim, ti se sustavi bitno razlikuju od linearnih vremenski invarijantnih sustava: odzivna funkcija ovisi o vremenskom toku pobudne funkcije, npr. o vremenu kada se narine ulazni signal. Ako se parametri sustava polako mijenjaju, može se i ovdje primijeniti linearna analiza.

Sve sustave koji se ne mogu opisati linearnim diferencijalnim jednažbama nazivamo nelinearnim sustavima, a prisutni su svuda u regulacijskoj tehnici. Pojedini sklopovi nelinearnih sustava imaju nelinearne statičke, odnosno dinamičke karakteristike, ili se pojavljuju multiplikativni članovi. Koeficijenti odgovarajuće nelinearne diferencijalne jednažbe jesu funkcije amplitude signala u nekoj točki sustava. Zbog toga prijelazna stanja ovise, osim o sustavu, i o obliku i amplitudi ulaznih signala, pa pri rješavanju nelinearnih diferencijalnih jednažbi ne možemo primijeniti načelo superpozicije. Tu nema opće metode, pa se rješenja razlikuju od slučaja do slučaja. Možemo općenito reći da postoje metode za analizu nelinearnih oscilacijskih sustava drugog reda, ali se o sustavima višeg reda malo zna. Zato se kvalitativna ocjena nelinearnih sustava višeg reda svodi na to da se oni zamijene jednostavnijim sustavom drugog reda s prevladavajućim oscilacijama.

Nelinearne pojave u regulacijskim sustavima općenito su nepoželjne jer unose dodatna kašnjenja u sustav, a zbog poteškoća oko analitičkog izraza teško je ili gotovo nemoguće predvidjeti ponašanje sustava kod raznih pobudnih signala. [4]

Da bi mogli izvesti automatsko upravljanje nekog tehničkog sustava prvo je potrebno odrediti matematički model sustava. Matematički model čini skup linearnih i/ili nelinearnih diferencijalnih i/ili algebarskih jednažbi koje opisuju dinamiku sustava. Kod izvođenja

matematičkog modela bitno je da je model točan jer nam točnost i mogućnost regulacije sustava ovisi upravo o tome.

Matematički model elektrohidrauličkog servosustava izrazito je nelinearan. Nelinearno dinamičko ponašanje sustava uzrokuju prije svega trenje i stlačivost fluida, što uzrokuje nelinearnu ovisnost tlaka i protoka zbog koje je otežano automatsko upravljanje elektrohidrauličkim servosustavom. Upravo iz ovih razloga koriste se inteligentne metode upravljanja, a jedna od njih je i primjena neizrazitih (*fuzzy*) regulatora.

U nastavku slijedi izvođenje jednadžbi koje opisuju nelinearni matematički model elektrohidrauličkog servosustava, u svrhu izrade simulacijskog modela. Izvod matematičkog modela koji slijedi preuzet je iz [1].

2.3.1 Model proporcionalnog razvodnika

Električni dio elektrohidrauličkog proporcionalnog razvodnika može se opisati slijedećim jednadžbama u prostoru stanja [5]:

$$\begin{bmatrix} \ddot{y}_v \\ \dot{y}_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2\zeta_v\omega_v & -\omega_v^2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y}_v \\ y_v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_v\omega_v^2 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

iz čega proilazi

$$\ddot{y}_v = -2\zeta_v\omega_v\dot{y}_v - \omega_v^2 y_v$$

$$\dot{y}_v = y_v$$

Provođenjem Laplaceove transformacije dobiva se:

$$s^2 y_v + 2\zeta_v\omega_v s y_v + \omega_v^2 y_v = K_v\omega_v^2 u$$

Nakon faktoriziranja dobiva se:

$$(s^2 + 2\zeta_v \omega_v s + \omega_v^2) y_v = K_v \omega_v^2 u$$

iz čega slijedi

$$\frac{y_v(s)}{u(s)} = \frac{K_v \omega_v^2}{s^2 + 2\zeta_v \omega_v s + \omega_v^2} = \frac{K_v}{\frac{1}{\omega_v^2} s^2 + \frac{2\zeta_v}{\omega_v} s + 1} \quad (2.1)$$

Jednadžba (2.1) predstavlja prijenosnu funkciju proporcionalnog razvodnika, a iz nazivnika prijenosne funkcije možemo zaključiti da se radi o proporcionalnom članu drugog stupnja (P_2 članu).

Popis članova prijenosne funkcije proporcionalnog razvodnika:

y_v - pozicija klipa proporcionalnog ventila [mm],

u - ulazni napon proporcionalnog ventila [V],

K_v - koeficijent pojačanja proporcionalnog ventila [m/V],

ω_v - vlastita frekvencija proporcionalnog ventila [rad/s],

ζ_v - koeficijent prigušenja proporcionalnog ventila.

Što se tiče hidrauličkog dijela proporcionalnog ventila, jednadžbe protoka kroz proporcionalni razvodnik prema [5] glase:

$$Q_1(y_v, p_1) = \begin{cases} y_v \sqrt{|p_s - p_1|} \operatorname{sign}(p_s - p_1), & y_v \geq 0 \\ y_v \sqrt{|p_1 - p_a|} \operatorname{sign}(p_1 - p_a), & y_v < 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

$$Q_1(y_v, p_2) = \begin{cases} -y_v \sqrt{|p_2 - p_a|} \operatorname{sign}(p_2 - p_a), & y_v \geq 0 \\ -y_v \sqrt{|p_s - p_2|} \operatorname{sign}(p_s - p_2), & y_v < 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

gdje je:

p_1 - tlak u lijevoj komori cilindra [Pa],

p_2 - tlak u desnoj komori cilindra [Pa],

p_s - tlak napajanja [Pa],

p_a - tlak spremnika [Pa]

U jednadžbama (2.2) i (2.3) pretpostavlja se da je tlak napajanja kao i tlak spremnika konstantna veličina, a protoci Q_1 i Q_2 jednakog su iznosa.

2.3.2 Model hidrauličkog cilindra

Za cilindar vrijedi slijedeća hidrodinamička jednadžba, prema [5]:

$$\frac{V}{B} \frac{dp}{dt} + \frac{dV}{dt} = Q \quad (2.4)$$

gdje je:

B - modul stišljivosti ulja [Pa],

V - volumen cilindra [m^3],

p - tlak u cilindru [Pa],

Q - protok cilindra [l/min].

Volumeni dviju komora cilindra mijenjaju se s pomakom klipa prema [5] na način:

$$\begin{aligned} V_1 &= V_0 + A_p x_p \\ V_2 &= V_0 - A_p x_p \end{aligned} \quad (2.5)$$

gdje je:

A_p - radna površina klipa cilindra [m^2],

V_0 - poluvolumen cilindra [m^3].

U izrazima (2.5) veličina A_p predstavlja radnu površinu klipa cilindra, a uvedena je pod pretpostavkom da su obje površine klipa jednake.

$$A_p = \frac{A_1 + A_2}{2} \quad (2.6)$$

gdje je:

A_1 - površina klipa cilindra na strani bez klipnjače [m^2],

A_2 - površina klipa na strani klipnjače [m^2].

Uvrštavanjem jednadžbi (2.5) u jednadžbu (2.4) dobiva se izraz koji opisuje ponašanje tlaka unutar dviju komora cilindra, gdje je v brzina klipa cilindra.

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{B}{V_0 + A_p x_p} (Q_1 - A_p \frac{dx_p}{dt}) \quad (2.7)$$

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{B}{V_0 - A_p x_p} (Q_1 + A_p \frac{dx_p}{dt}) \quad (2.8)$$

Ravnoteža sila u sustavu može se opisati dinamičkom jednadžbom:

$$(M + M_0) \frac{d^2 x_p}{dt^2} = A_p p_1 - A_p p_2 - b \frac{dx_p}{dt} - c x_p - F_{tr} \quad (2.9)$$

gdje je:

M_0 - masa klipa i klipnjače [kg],

M - masa tereta [kg],

b - koeficijent prigušenja tereta [Ns/m],

c - koeficijent elastičnosti tereta [N/m],

F_{tr} - sila trenja koja se zanemaruje [N].

Iz jednadžbi (2.2), (2.3), (2.7), (2.8) i (2.9) vidi se nelinearna zavisnost varijabli matematičkog modela elektrohidrauličkog servosustava. Radi se o sustavu sa pet jednadžbi od kojih su dvije diferencijalne prvog reda, a posljednja diferencijalna jednadžba drugog reda.

2.3.2 Dinamika elektrohidrauličkog servosustava

Pozivajući se na izraz (2.1), prijenosna funkcija poprima oblik:

$$G(s) = \frac{y_v(s)}{u(s)} = \frac{K_v}{\frac{1}{\omega_v^2} s^2 + 2 \frac{\zeta_v}{\omega_v} s + 1} \quad (2.10)$$

Iz gornjeg izraza možemo vidjeti da je dinamika sustava opisana proporcionalnim članom drugog reda (P_2 članom).

Prijenosna funkcija hidrauličkog cilindra upravljanog proporcionalnim razvodnikom ima oblik:

$$G(s) = \frac{x_p(s)}{y_v(s)} = \frac{\frac{K_q}{A_p}}{s(\frac{s^2}{\omega_c^2} + 2\frac{\zeta_c}{\omega_c}s + 1)} \quad (2.11)$$

gdje su:

$$K_q = \frac{\partial Q_L}{\partial y_v} = \sqrt{2}\pi C_d d_v \sqrt{\frac{p_s - p_a}{\rho}} \quad (2.12)$$

Gdje je:

K_q - koeficijent pojačanja protoka razvodnika [m^3/ms],

Q_L - protok fluida kroz razvodnik [m^3/s],

y_v - pomak klipa razvodnika [m],

C_d - koeficijent istjecanja razvodnika,

d_v - promjer klipa razvodnika [m],

ρ - gustoća fluida [kg/m^3].

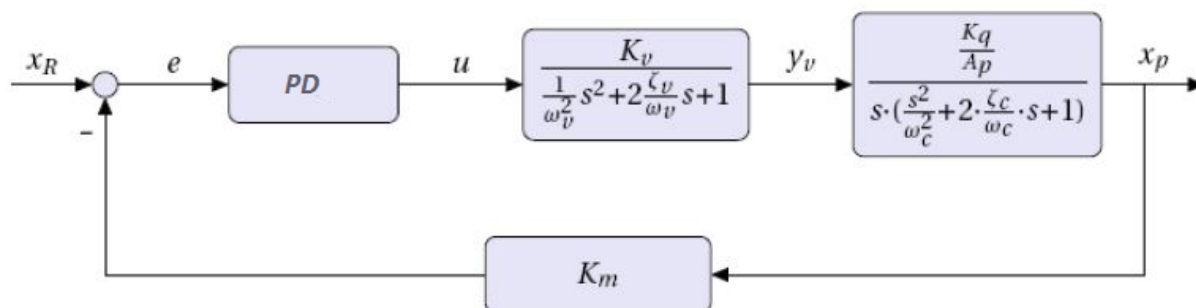
$$\omega_c = \sqrt{\frac{4BA_p^2}{V_t M}} \quad (2.13)$$

ω_c - neprigušena vlastita frekvencija hidrauličkog cilindra upravljanog proporcionalnim razvodnikom [rad/s]

$$\zeta_c = \frac{K_{ce}}{A_p} \sqrt{\frac{B M}{V_t}} + \frac{b}{4A_p} \sqrt{\frac{V_t}{B M}} \quad (2.13)$$

ζ_c - faktor prigušenja hidrauličkog cilindra

Na slici 2.5 prikazana je blok shema regulacijskog kruga elektrohidrauličkog servosustava, napravljena na temelju matematičkog modela sustava. Regulacija se vrši PD regulatorom pojačanja K_R i vremenske konstante D člana T_d . Ova shema predstavlja linearizirani model elektrohidrauličkog servosustava koji se neće koristiti prilikom sinteze neizrazitog regulatora.



Slika 2.5 Linearizirani model elektrohidrauličkog servosustava

Linearizirani model elektrohidrauličkog servosustava nije potreban za izvođenje simulacija u ovome radu, ali je prikazan u edukacijske svrhe.

3 NEIZRAZITA LOGIKA

3.1 Povijest

Klasična je teorija skupova osnova matematike 19. stoljeća. Uveo ju je njemački matematičar *G. Cantor*. U ondašnjem je vremenu bila revolucionarna ideja. Izvorna definicija skupa glasi:

„Skup je grupa određenih, različitih predmeta iz materijalnog ili misaonog svijeta koji čine cjelinu.“

Teorija skupova svrstava se u temeljnu disciplinu suvremene matematike. Tako definirane skupove danas poznajemo kao „obične ili oštre skupove“ ili kao „izrazite skupove“. Za svaki element tih skupova moguće je zapisati jednoznačnu pripadnost oblika: da/ne, visoko/nisko, puno/malo, ili u *Booleovoj* logici 1/0. To znači da je pripadnost skupu strogo definirana, određen predmet ili pojam je ili nije član skupa. Poljski matematičar *Lukasiewicz* dodao je još treću mogućnost (granični primjer). Po toj teoriji raspoložive su mogućnosti: 0 (nepravilno), $\frac{1}{2}$ (moguće), 1 (pravilno).

Slijedeći odlučujući korak, koji se može smatrati prekretničkim, napravio je matematičar iranskog podrijetla *Lofti A. Zadeh*, (1962). Njegova je ideja uvođenje „neizrazite“, „meke“ pripadnosti skupu koja se koristi pri kvalitativnom opisu predmeta ili pojma, kao na primjer: vrlo veliko, veliko, srednje veliko, malo, vrlo malo. Predloženi su postupci matematički utemeljeni i definirani. Teorija neizrazitih skupova daje osnovu za uvođenje grubljeg opisa s uporabom lingvističkih izreka. *Zadeh* je svakom predmetu (pojmu) kao elementu skupa dodijelio funkciju pripadnosti (*membership function*) μ koja govori u kolikoj je mjeri predmet element skupa. U normiranom obliku funkcija pripadnosti poprima vrijednost između $\mu=0$ (predmet nije element skupa) i $\mu=1$ (predmet u potpunosti pripada skupu). Za tako definirane skupove *Zadeh* je (1965) uveo izraz *fuzzy*. Tako su dobiveni izrazi: neizraziti skup (*Fuzzy Set*), neizrazita logika (*Fuzzy Logic*), neizrazita aritmetika (*Fuzzy Arithmetic*), neizrazito upravljanje (*Fuzzy Control*), neizraziti ekspertni sustavi (*Fuzzy Expert Systems*), neizrazito izračunavanje (*Fuzzy Computing*), neizraziti model (*Fuzzy Model*), itd. Tako predviđeno proširenje ishodišta 0/1 pripadnosti nekom skupu otvara mogućnost uporabe kvalitativnih (lingvističko formalnih) čovjekovih spoznaja.

Posebno je velik procvat i realizaciju *Zadehova* teorija doživjela u Japanu. Često se u literaturi postavlja pitanje zašto takav procvat baš u Japanu. Vjerojatno odgovor leži u osnovi azijskog načina razmišljanja koji nije daleko od „fuzzy logike“. Primjerice „da“ na japanskom jeziku znači sve u rasponu između potvrđivanja i nepotvrđivanja. Razlog za 25. godišnje odlaganje razvijenih zapadnih zemalja da prime tu ideju jako je dobro objasnio sam *Zadeh* koji je rekao da razlog vidi u (zapadnoj) tradiciji koja s velikim štovanjem uzima sve ono što je precizno i kvalitetno i odbacuje sve što nije tako.[6]

Japanska industrija tako je počela s agresivnom ponudom *fuzzy* ideje u obliku komercijalnih realizacija. Uporaba *fuzzy* logike u Japanu naglo se proširila i na druga područja automatizacije (transportni sustavi, roboti, procesna industrija, automobilska industrija, ekologija itd.)

Godine 1985. održan je prvi kongres IFSA (*International Fuzzy Systems Association*), međunarodnog udruženja za neizrazite skupove.

Koncem 1990. godine opažaju se prvi ozbiljniji odzivi u Europi i SAD-u. [6]

3.2 Osnove neizrazite logike

Izvorna definicija neizrazitih skupova, prema [6] glasi:

„Neizraziti skup A definiran u skupu X okarakteriziran je funkcijom pripadnosti (karakterističnom funkcijom) $\mu(x)$ koja svakom elementu x skupa X pridružuje realni broj u intervalu $[0,1]$, s vrijednošću $\mu(x)$, gdje je $\mu(x)$ stupanj pripadnosti elementa x u skupu A.“

Osnovni je problem pri praktičnoj realizaciji teorije neizrazitih skupova određivanje odnosno odabir odgovarajućih funkcija pripadnosti.

Osnova neizrazite (*fuzzy*) teorije su neizraziti skupovi. U upravljačkoj tehnici upotrebljavaju se najviše za matematički opis procesa s jezičnim pravilima oblika:

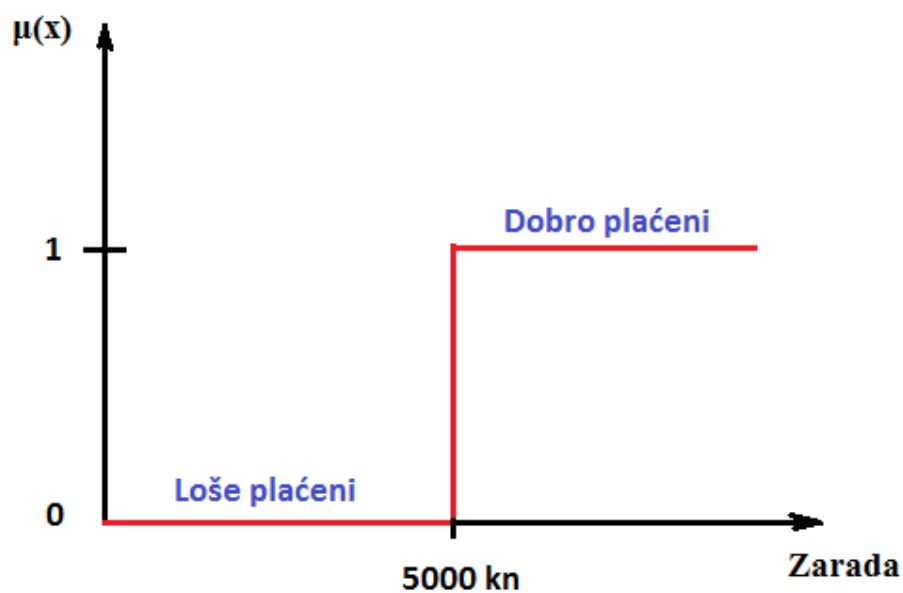
AKO (IF) <uvjet-premise>, ONDA (THEN) <posljedica-conclusion>

u kojima upotrebljavamo jezične varijable tipa:

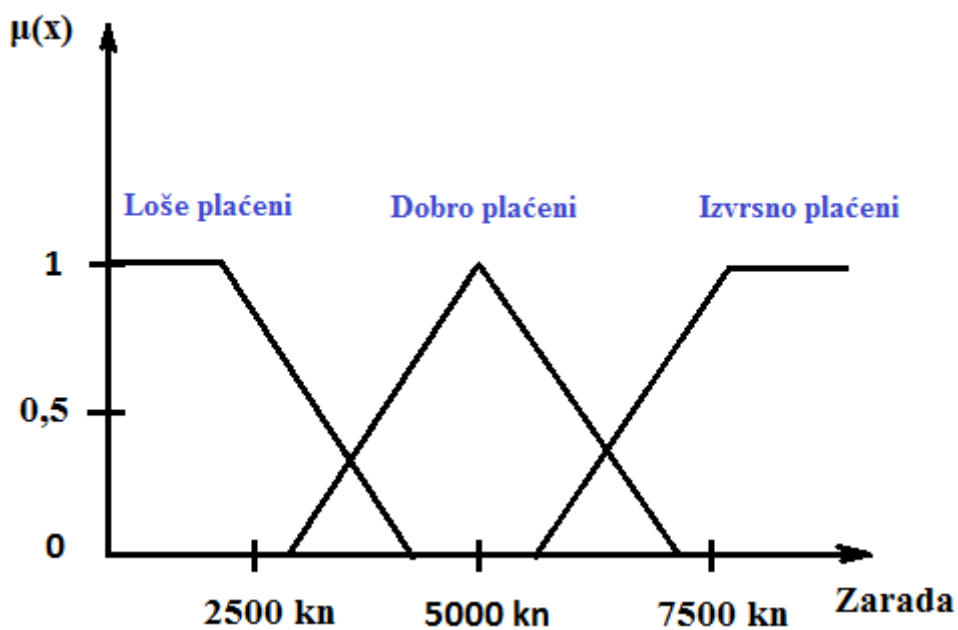
VRLO NIZAK, NIZAK, VISOK, VRLO VISOK, VRLO VRLO VISOK

odnosno druge slične jezične varijable koje su poznate i kao lingvističke varijable [7].

Korištenje operatora ako i onda, kojima povezujemo jezične varijable, vrlo je slično ljudskom razmišljanju. Svima je poznato da se čovjek u opisu činjenica i zaključivanju služi jezikom koji je neprecizan, odnosno koristi se velikim brojem jezičnih varijabli te na taj način vrši kategorizaciju koja je potrebna za svakodnevno razumijevanje i opisivanje problema. Kao primjer uzmimo kategorizaciju ljudi prema mjesečnim prihodima. Prema pravilima izrazite logike određeno je da ljudi koji zarađuju manje od pet tisuća kuna spadaju u kategoriju ljudi sa malom zaradom. Oni koji imaju mjesečne prihode veće od pet tisuća kuna, spadaju u kategoriju dobro plaćenih ljudi. Izrazita logika daje nam tako mogućnost da ljude, promatrajući ih prema zaradi, svrstamo samo u dvije kategorije, što nimalo nije slično ljudskom načinu razmišljanja. Gledajući problem na ovaj način, netko tko zarađuje četiri tisuće i devetsto kuna mjesečno, spadao bi u kategoriju ljudi sa malom zaradom, a netko tko zarađuje dvjesto kuna više, spadao bi u kategoriju dobro plaćenih ljudi. Neizrazita logika daje nam puno više mogućnosti kategorizacije, što nam omogućuje puno preciznije definiranje stvarnog stanja. Stoga za osobu koja zarađuje četiri tisuće i petsto kuna možemo reći da ima nešto manju plaću, a za osobu koja zarađuje šest tisuća kuna možemo reći da ima srednje visoku plaću. Isto tako ako netko zarađuje petnaest tisuća kuna, može se reći da zarađuje jako puno, a ako netko zarađuje tisuću kuna, mogli bi reći da zarađuje jako malo. Možemo vidjeti da nam primjena neizrazite logike daje puno veću mogućnost kategorizacije od izrazite logike. Na slici 3.1 prikazana je funkcija pripadnosti $\mu(x)$ u slučaju primjene izrazite logike, dok je na slici 3.2 prikazana funkcija pripadnosti $\mu(x)$ u slučaju primjene neizrazite logike.



Slika 3.1 Funkcija pripadnosti kod primjene izrazite logike



Slika 3.2 Funkcija pripadnosti kod primjene neizrazite logike

Za izrazite skupove koristi se funkcija pripadnosti μ koja ima binarni oblik:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{za } x \in A \\ 0, & \text{za } x \notin A \end{cases}$$

U izrazitom skupu (*Crisp Set*) za svaki je element jednoznačno određena pripadnost ($\mu_A=1$) ili nepripadnost ($\mu_A=0$) skupu.

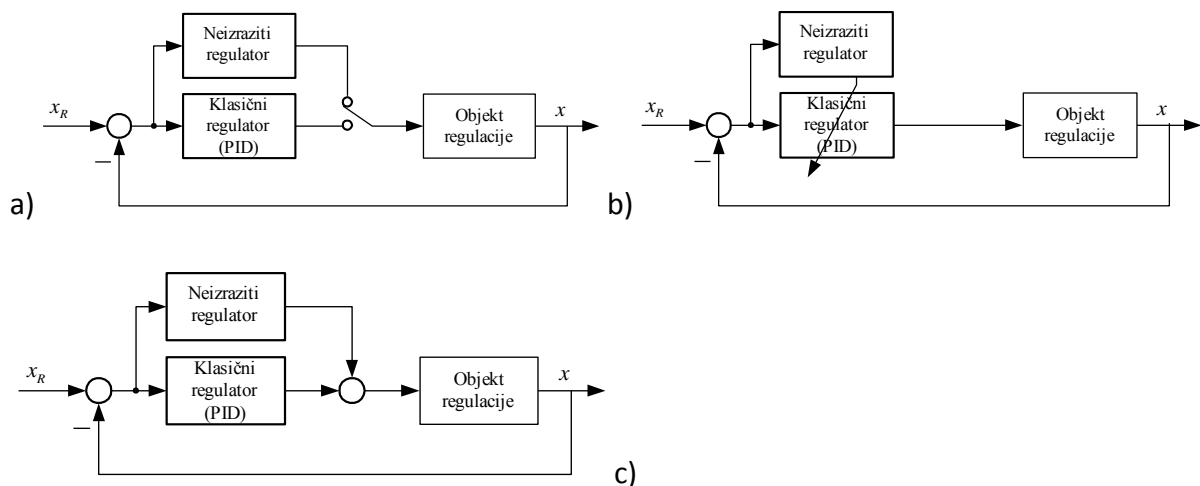
Ako se za isti primjer definira skup A tako da njegove vrijednosti x (u ovom slučaju visina primanja) označavaju određenu jezičnu vrijednost, onda jednoznačnost pripadnosti ili nepripadnosti svih elemenata x skupu A nije više izrazita. Neizrazito područje opisuje se kontinuiranom funkcijom pripadnosti $\mu_A(x)$.

3.3 Neizrazito upravljanje u regulacijskim sustavima

U području automatske regulacije neizraziti regulator prepoznat je kao obećavajuća alternativa klasičnim tipovima regulatora za ostvarenje boljih performansi procesa regulacije. Glavni razlog za primjenu neizrazitih regulatora je upravo nelinearnost realnih regulacijskih objekata, što uzrokuje različito dinamičko ponašanje sustava u različitim radnim točkama.

Najčešće se regulacijski sustavi u praksi temelje na matematičkom modelu sustava opisanog pomoću jedne ili više diferencijalnih jednažbi kojima se definira odziv sustava na njegovu ulaznu funkciju. Za reguliranje takvih sustava koristi se postupak lineariziranja sustava u okolišu radne točke, a kao regulator primjenjuje se uglavnom klasični PID regulator, različitim postupcima modificiran, s optimiranim parametrima da bi što bolje vodio proces. Iako su se ovi postupci kroz desetljeća razvijanja i primjene pokazali vrlo uspješnim u mnogobrojnim situacijama, u mnogim slučajevima matematički model regulacijskog procesa ne postoji ili bi postupak dobivanja modela bio vrlo složen i zahtjevan za računalno procesiranje. Upravo u takvim situacijama neizrazito upravljanje može biti od velike koristi. [7]

Sustavi neizrazitog upravljanja daju se nadograditi na postojeća rješenja, te na taj način poboljšati klasičnu metodu, uvođenjem dodatne razine inteligencije. Neki od tih načina prikazani su na slici 3.3 .



Slika 3.3 Nadogradnja neizrazitog upravljanja na postojeća rješenja

Na slici 3.3a) neizraziti regulator u potpunosti zamjenjuje postojeće klasično rješenje. Upravo ta struktura korištena je za simuliranje elektrohidrauličkog sustava u ovome radu. Na taj način vrlo jednostavno se mogu uspoređivati rezultati simulacije dobiveni klasičnim regulatorom i neizrazitim (*fuzzy*) regulatorom. U strukturi na slici 3.3b) neizraziti regulator predstavlja nadređenu razinu upravljanja i služi za podešavanje parametara klasičnog regulatora. U strukturi prikazanoj na slici 3.3c) klasični regulator izvodi algoritam regulacije ukoliko je stanje procesa u blizini stanja razmatranog pri postupku sinteze regulatora. Uloga neizrazitog regulatora je prilagodba upravljačkog signala promijenjenim okolnostima procesa. [7]

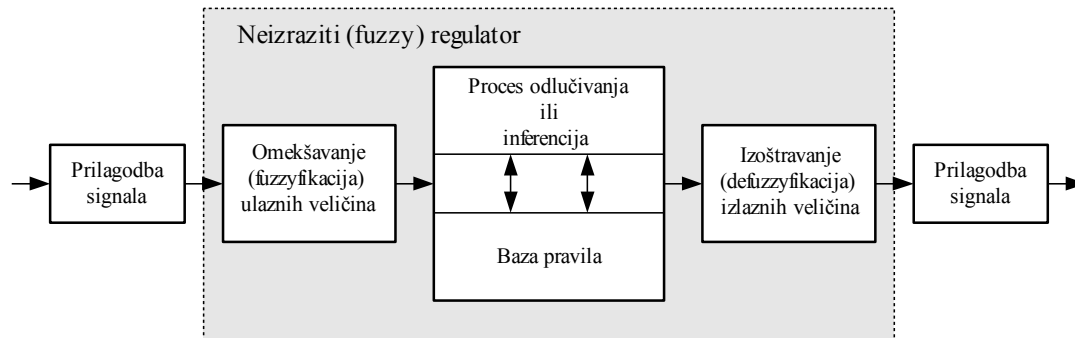
3.3.1 Sinteza neizrazitog PD regulatora

Neizraziti regulator se, neovisno o području primjene, u osnovi sastoji od nekoliko karakterističnih sastavnih dijelova[7]:

- postupak **omekšavanja** ili **fuzzyfikacija**, kojim se numeričke vrijednosti ulaznih varijabli prevode u lingvističke varijable, odnosno neizrazite skupove. Pri tome se mjerene vrijednosti ulaznih varijabli moraju nalaziti unutar područja definicije neizrazitih skupova.

- **neizrazita baza pravila i proces odlučivanja** omogućuju promjene parametara regulatora, definiranjem lingvističkih pravila kojima se aktivira određena upravljačka akcija na temelju stanja procesa.
- **postupak izoštravanja ili defuzzyfikacija**, kojim se iz neizrazitih skupova dobivenih iz aktiviranih pravila formira upravljački signal kao postavna veličina regulatora.

Općenita struktura neizrazitog regulatora prikazana je na slici 3.4.



Slika 3.4 Općenita struktura neizrazitog regulatora

Kod regulacije elektrohidrauličkog servosustava ulazne veličine u neizraziti regulator rezultat su mjerenja veličina iz procesa. Zbog toga trenutačne izrazite vrijednosti signala iz procesa potrebno je tzv. postupkom omekšavanja ili fuzzyfikacije prevesti u odgovarajući oblik stupnja pripadnosti jednom ili više neizrazitih skupova primjeren neizrazitom postupku odlučivanja.

Svako ulaznoj veličini x_m iz procesa pridružuje se vrijednost stupnja pripadnosti neizrazitom skupu nad domenama ulaza:

$$x_i = \mu_i(x_m), \quad \text{za } 1 \leq i \leq N$$

gdje je:

x_i - iznos stupnja pripadnosti,

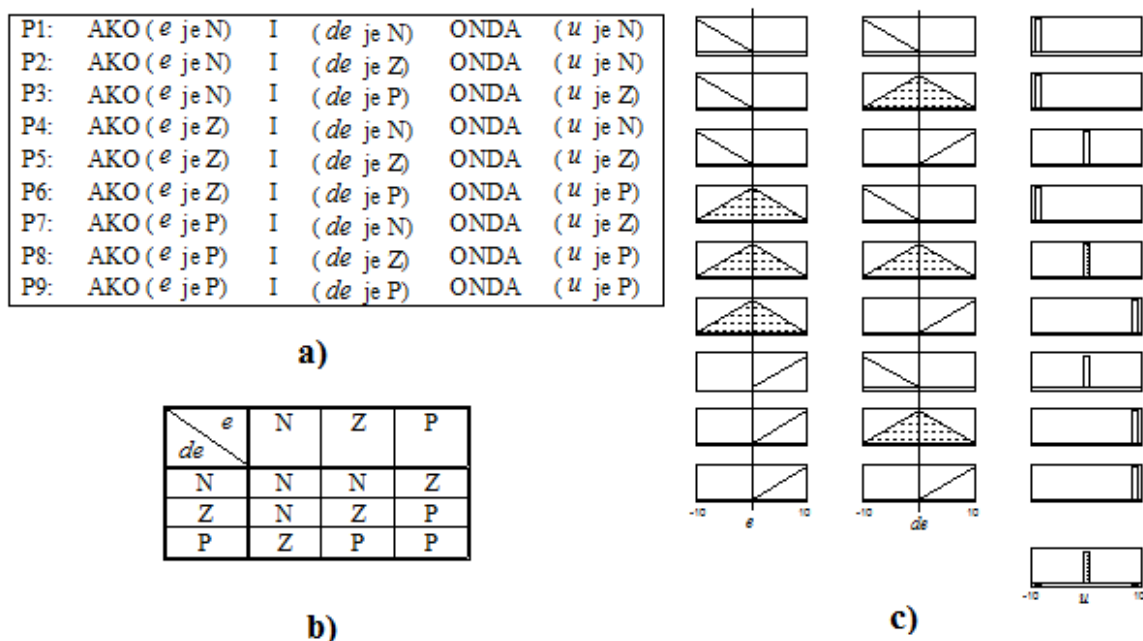
μ_i - i-ta funkcija pripadnosti ulazne veličine,

x_m - izrazita veličina dobivena na temelju mjerenja veličina iz procesa

N - broj osnovnih funkcija pripadnosti nad domenama ulaza.

Za ostvarenje zakona regulacije sustava primjenom neizrazitog regulatora najvažniji dio postupka projektiranja regulatora predstavlja postavljanje mehanizma zaključivanja ili inferencije na temelju odgovarajuće baze pravila ponašanja svojstvene reguliranom sustavu. Paralelna struktura baze pravila odlučivanja je najvažnija značajka neizrazitog sustava pomoću koje se dobiva mogućnost glatkog prijelaza između područja gdje je ponašanje sustava dominantno određeno prema jednom ili drugom pravilu ponašanja. U regulacijskoj tehnici najčešće se za matematički opis procesa koriste jezična pravila oblika AKO-ONDA. [7]

Na slici 3.5 prikazani su različiti oblici zapisa baze pravila ponašanja neizrazitog regulatora, sa dvije ulazne veličine (e , de) i jednom izlaznom veličinom (u), čije su domene podijeljene funkcijama pripadnosti (N - negativno, Z - nula, P - pozitivno).



Slika 3.5 Različiti oblici zapisa baze pravila neizrazitog regulatora

Na slici je prikazan najjednostavniji primjer u kojem postoje samo tri funkcije pripadnosti, što nam daje ukupno devet pravila. U ovome radu za simulaciju i rad na stvarnom sustavu najviše su korišteni regulatori sa pet funkcija pripadnosti, što daje ukupno dvadeset i pet pravila. Što se više funkcija pripadnosti koristi, rad regulatora bi trebao biti sve precizniji. Izgled matrice koja sadrži funkcije pripadnosti i lista pravila prikazani su na slici 3.6 i slici 3.7.

$de \backslash e$	NV	NM	Z	PM	PV
NV	NV	NV	NV	NM	Z
NM	NV	NV	NM	Z	PM
Z	NV	NM	Z	PM	PV
PM	NM	Z	PM	PV	PV
PV	Z	PM	PV	PV	PV

Slika 3.6 Matrica baze pravila neizrazitog regulatora

- P1: *AKO* ($e=NV$) *I* ($de=NV$) *ONDA* ($u=NV$)
P2: *AKO* ($e=NV$) *I* ($de=NM$) *ONDA* ($u=NV$)
P3: *AKO* ($e=NV$) *I* ($de=Z$) *ONDA* ($u=NV$)
P4: *AKO* ($e=NV$) *I* ($de=PM$) *ONDA* ($u=NM$)
P5: *AKO* ($e=NV$) *I* ($de=Z$) *ONDA* ($u=Z$)
P6: *AKO* ($e=NM$) *I* ($de=NV$) *ONDA* ($u=NV$)
P7: *AKO* ($e=NM$) *I* ($de=NM$) *ONDA* ($u=NV$)
P8: *AKO* ($e=NM$) *I* ($de=Z$) *ONDA* ($u=NM$)
P9: *AKO* ($e=NM$) *I* ($de=PM$) *ONDA* ($u=Z$)
P10: *AKO* ($e=NM$) *I* ($de=Pv$) *ONDA* ($u=PM$)
P11: *AKO* ($e=Z$) *I* ($de=NV$) *ONDA* ($u=NV$)
P12: *AKO* ($e=Z$) *I* ($de=NM$) *ONDA* ($u=NM$)
P13: *AKO* ($e=Z$) *I* ($de=Z$) *ONDA* ($u=Z$)
P14: *AKO* ($e=Z$) *I* ($de=PM$) *ONDA* ($u=PM$)
P15: *AKO* ($e=Z$) *I* ($de=Pv$) *ONDA* ($u=Pv$)
P16: *AKO* ($e=PM$) *I* ($de=NV$) *ONDA* ($u=NM$)
P17: *AKO* ($e=PM$) *I* ($de=NM$) *ONDA* ($u=Z$)
P18: *AKO* ($e=PM$) *I* ($de=Z$) *ONDA* ($u=PM$)
P19: *AKO* ($e=PM$) *I* ($de=PM$) *ONDA* ($u=Pv$)
P20: *AKO* ($e=PM$) *I* ($de=Pv$) *ONDA* ($u=Pv$)
P21: *AKO* ($e=Pv$) *I* ($de=NV$) *ONDA* ($u=Z$)
P22: *AKO* ($e=Pv$) *I* ($de=NM$) *ONDA* ($u=PM$)
P23: *AKO* ($e=Pv$) *I* ($de=Z$) *ONDA* ($u=Pv$)
P24: *AKO* ($e=Pv$) *I* ($de=PM$) *ONDA* ($u=Pv$)
P25: *AKO* ($e=Pv$) *I* ($de=Pv$) *ONDA* ($u=Pv$)

Slika 3.7 Lista naredbi neizrazitog regulatora

Oznake na slikama imaju značenje:

NV - negativno veliko,

NM - negativno malo,

Z - nula,

PM - pozitivno malo,

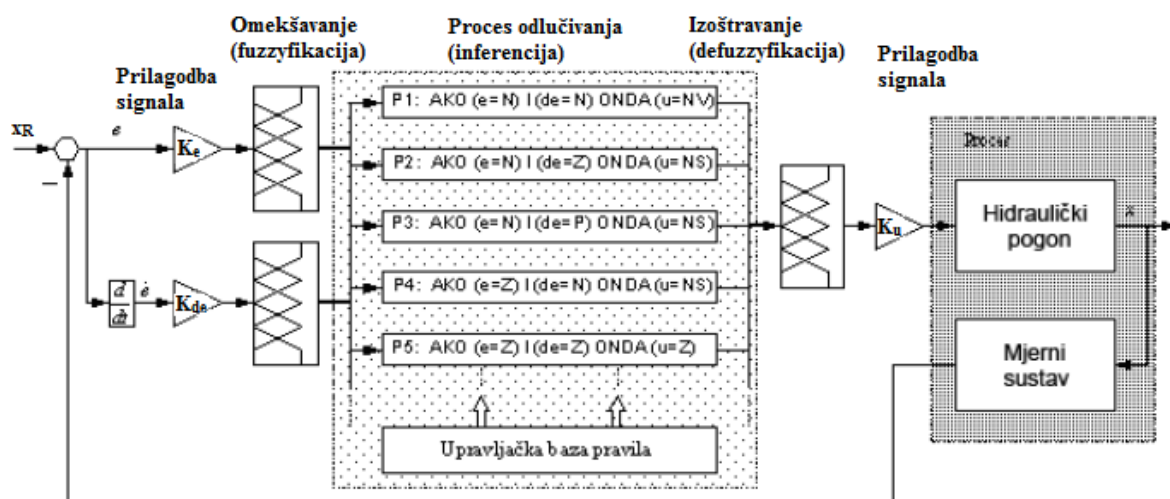
PV - pozitivno veliko.

Budući da upravljački element (proporcionalni ventil) može operirati samo s realnim signalima (analogna vrijednost napona), a kao rezultat računanja s neizrazitim skupovima dobiva se također neizraziti skup, potrebno je izvršiti postupak izoštravanja (defuzzyfikaciju) rezultata postupka zaključivanja. Na taj način dobiva se na izlazu neizrazitog regulatora izrazita vrijednost (engl. *crisp signal*) kao postavna veličina regulatora. Nema sistematičnog postupka za izbor načina izoštravanja neizrazitih vrijednosti, međutim u regulacijskoj tehnici prevladava metoda težišta (engl. *center of gravity method*) zbog dobrih interpolacijskih svojstava ove metode. [7]

3.3.2 Struktura neizrazitog PD regulatora

Cilj projektiranja neizrazitog regulatora je projektirati regulator koji će biti u stanju nositi se sa problemima prisutnih nelinearnosti i promjenljivosti parametara procesa u tijeku regulacije.

Struktura neizrazitog PD regulatora, poznata je iz literature, a prikazana je na slici 3.8. Na temelju inženjerskog iskustva iz literature je poznato da se za regulaciju položaja hidrauličkog cilindra sa servorazvodnikom primjenjuju P ili PD regulatori. U ovome radu prvi korak projektiranja neizrazitog regulatora usmjeren je ka realizaciji neizrazitog PD regulatora.



Slika 3.8 Struktura neizrazitog PD regulatora

4 SIMULACIJA SUSTAVA

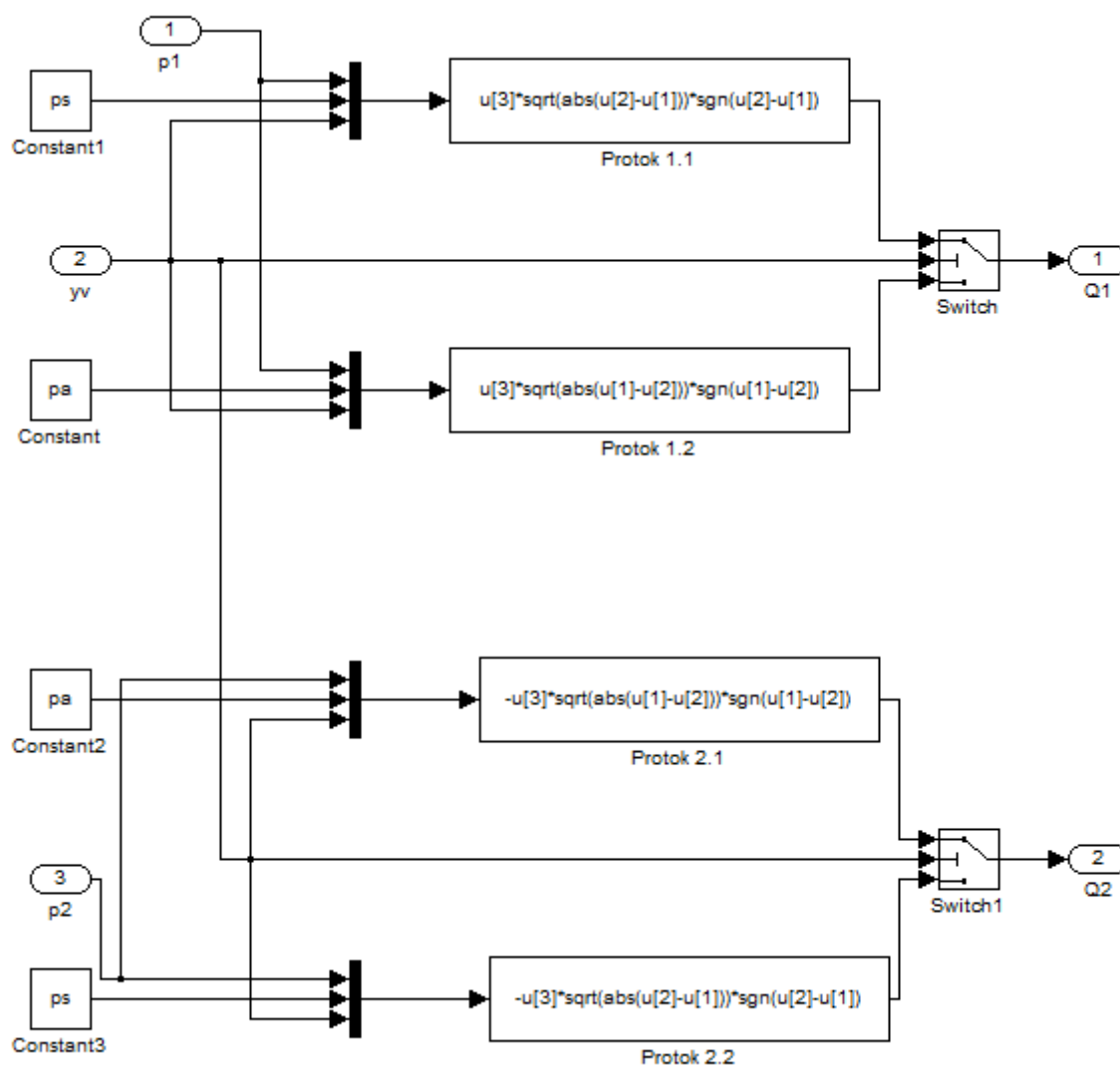
U današnjem vremenu uporaba simulacijskih programskih paketa za modeliranje, simuliranje i optimiranje regulacijskih sustava vrlo je velika. Simulaciju možemo definirati kao umjetno stvorenu okolinu u kojoj egzistiraju uvjeti identični onima u stvarnosti. U ovome radu simulacija elektrohidrauličkog servosustava biti će izvedena pomoću računalnog programa SIMULINK/MATLAB. Simulink je dio programa Matlab, odnosno programski paket namjenjen za izvođenje simulacija. Simulink je alat za modeliranje, simuliranje i analizu dinamičkog ponašanja sustava, koji mogu biti linearni ili nelinearni, te vremenski kontinuirani ili diskretni. Prednost ovakvih simulacijskih alata je u mogućnosti generiranja izvršnog koda u realnom vremenu (*real-time executable code*) direktno iz simulacijskog modela, a kasnije moguće je kodove prenijeti u upravljačko računalo nekog namjenskog uređaja. Ovaj postupak koristiti će se za generiranje *real-time* koda za upravljanje eksperimentalnim uređajem elektrohidrauličkog servosustava.

4.1 Simulacijski model sustava

4.1.1 Izrada simulacijskog modela

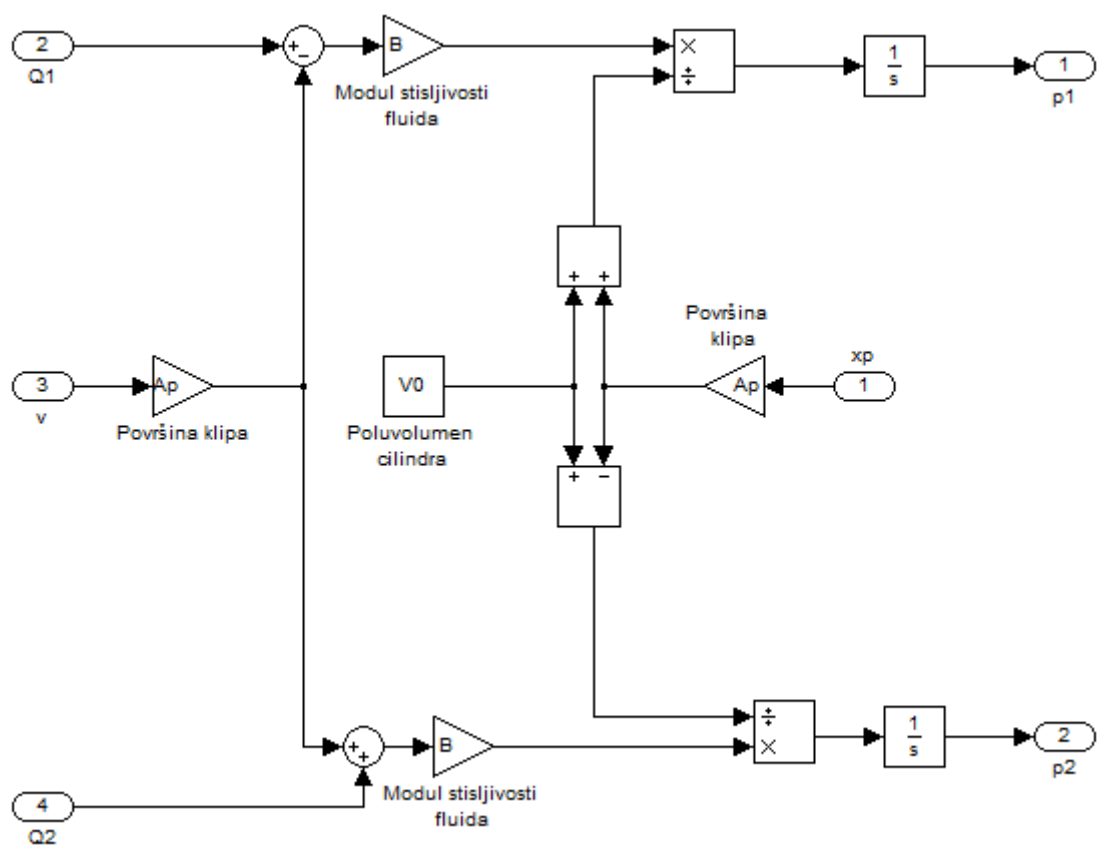
Simulacijski model sustava izrađen je u programskom paketu Simulink prema prethodno dobivenom matematičkom modelu elektrohidrauličkog sustava.

Slika 4.1 blokovski prikazuje jednadžbe protoka kroz proporcionalni ventil.



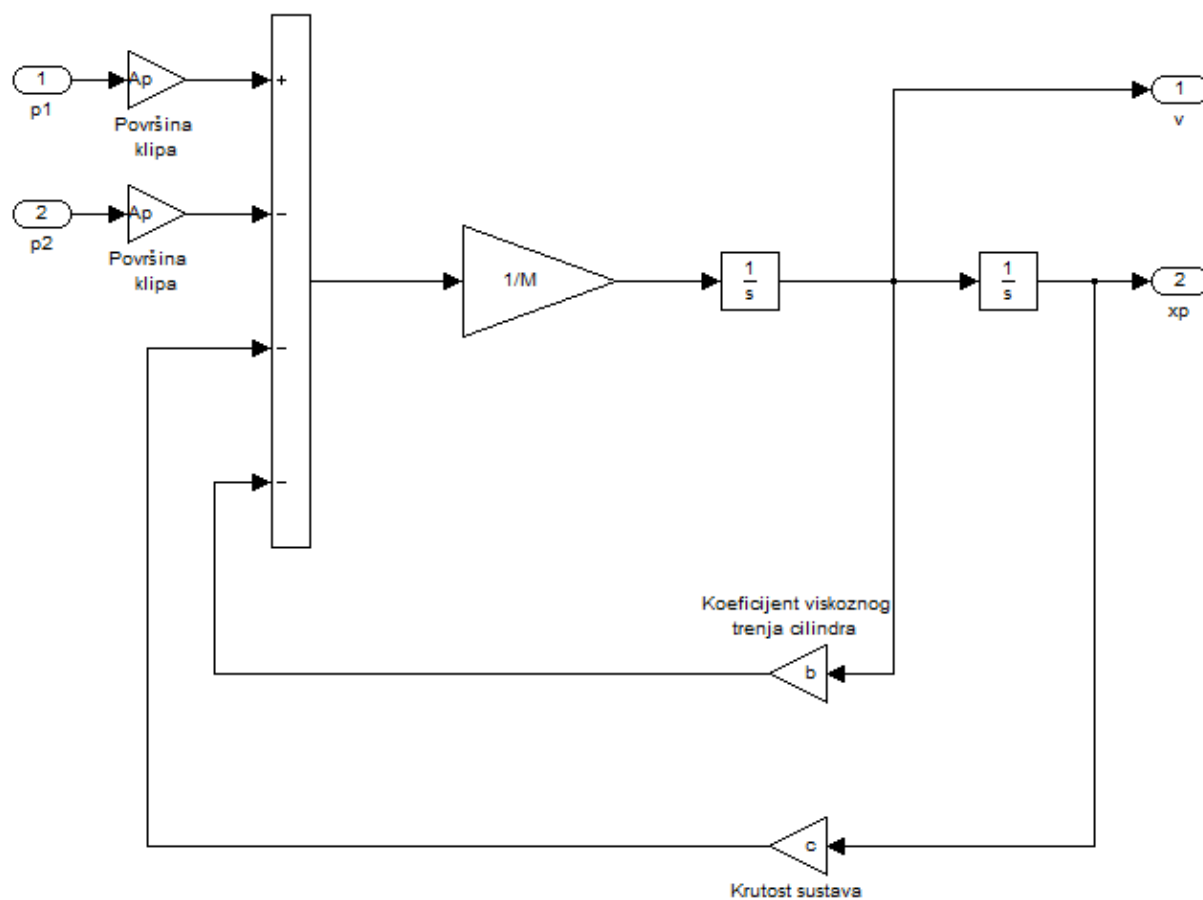
Slika 4.1 Blok shema jednadžbe protoka kroz proporcionalni ventil

Promjene tlakova u sustavu prikazuje slika 4.2.



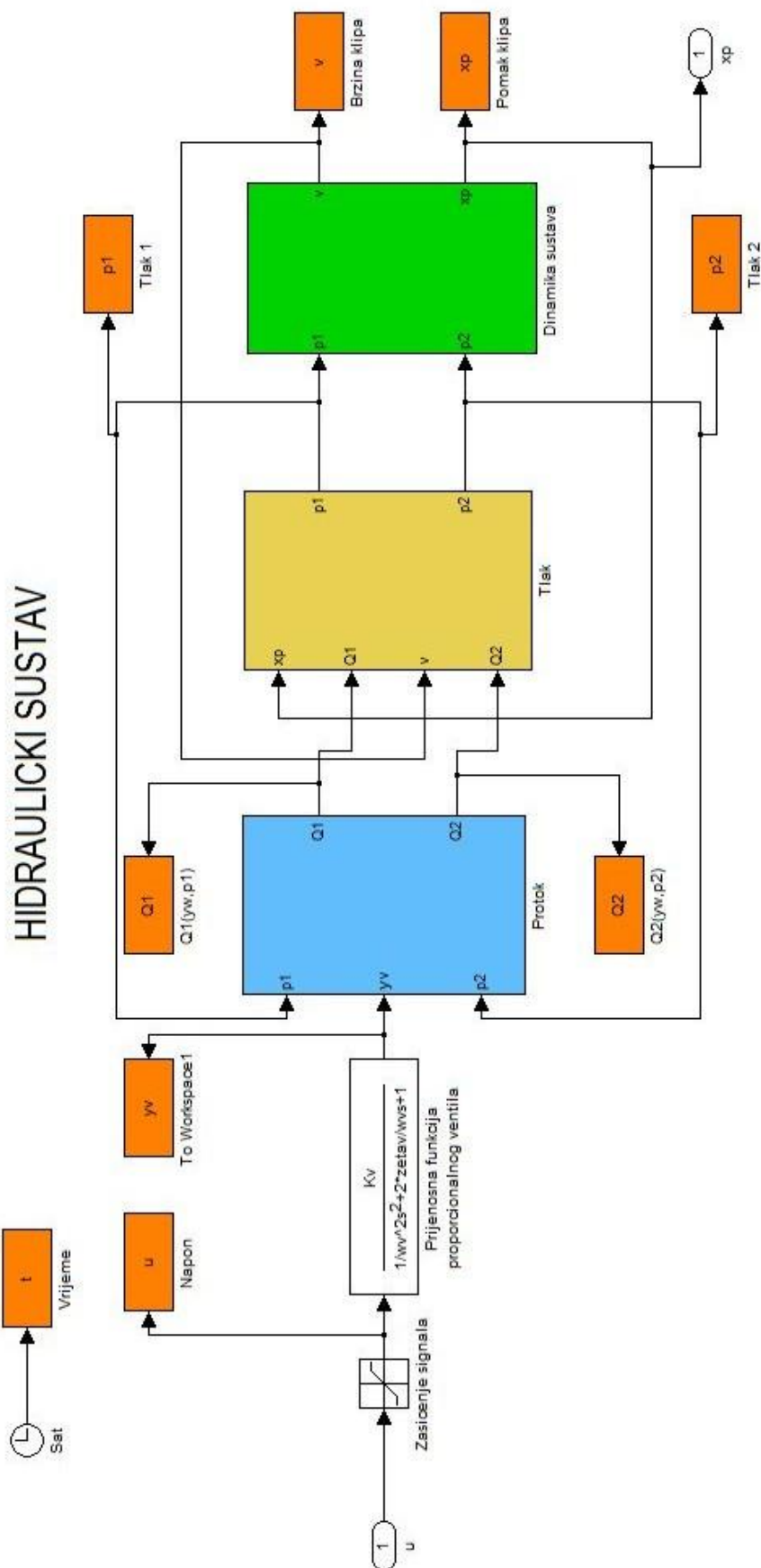
Slika 4.2 Blok shema promjena tlakova u sustavu

Treću cjelinu predstavlja shema ravnoteža sila u sustavu, prikazana slikom 4.3.

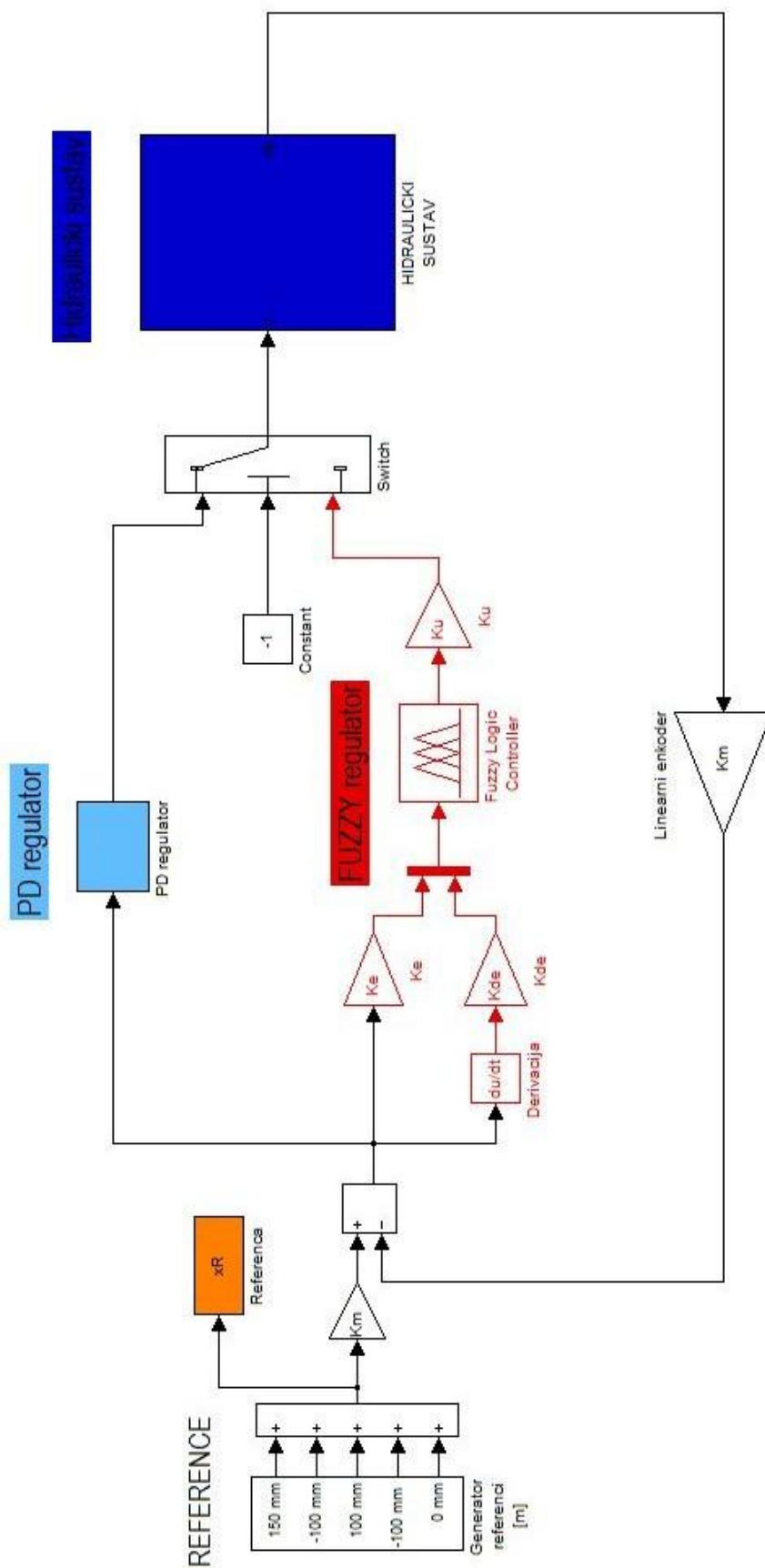


Slika 4.3 Blok shema ravnoteža sila u sustavu

Sve tri cijeline zatim se spajaju, te je dobivena shema nelinearnog modela elektrohidrauličkog servosustava, što je prikazano na slici 4.4.



Slika 4.4 Blok shema nelinearnog sustava elektrohidrauličkog servosustava



Slika 4.5 Model za simulaciju elektrohidrauličkog servosustava

Na slici 4.5 prikazan je model za simulaciju elektrohidrauličkog servosustava. U sustavu se nalaze klasični PD regulator i neizraziti regulator koji su spojeni na sklopku pomoću koje se može odabrati kojim regulatorom želimo regulirati sustav.

4.1.2 Parametri sustava

Parametri elektrohidrauličkog servosustava preuzeti su iz literature [1].

Vrijednosti parametara eksperimentalne opreme dani su na slici 4.6.

Ime varijable	Opis varijable	Vrijednost
M	Masa tereta	1000 [kg]
b	Koeficijent viskoznog trenja cilindra	455 [Ns/m]
B	Koeficijent stišljivosti ulja	$1350 \cdot 10^6$ [Pa]
ρ	Gustoća ulja	885 [kg/m ³]
c	Koeficijent elastičnosti tereta	10^5 [N/m]
l	Hod klipa cilindra	300 [mm]
v_1	Brzina izvlačenja klipnjače	31 [mm/s]
p_s	Tlak napajanja	100 [bar]
p_a	Tlak spremnika	1 [bar]

Slika 4.6 Parametri eksperimentalne opreme

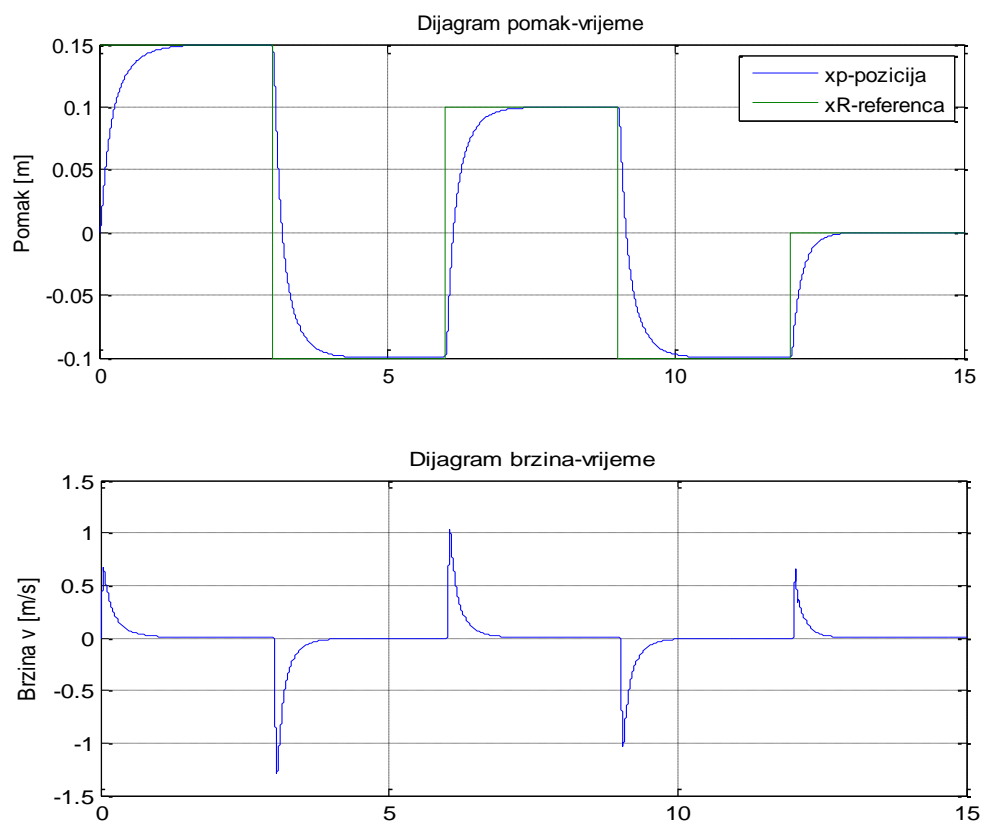
Vrijednosti parametara nelinearnog simulacijskog modela elektrohidrauličkog servosustava dane su na slici 4.7. Pojačanje regulatora K_R određeno je metodom pokušaja i pogrešaka, jednako kao i vremenska konstanta T_d koja iznosi 0,001.

wv=100.5;	%rad / s
zeta_v=0.4;	% –
Kv=5.5*10 ^{^(-7)} ;	% m/mA
Ap=0.0014543;	% m ^{^2}
V0=0.000218146;	% m ^{^3}
B=1350*10 ^{^6} ;	% Pa
ps=150*10 ^{^5} ;	% Pa
pa=10 ^{^5} ;	% Pa
M=1000;	% kg
b=455;	% Ns/m
c=10 ^{^5} ;	% N/m
Km=33.33;	% V/m
KR=0.15;	%pojacanje regulatora

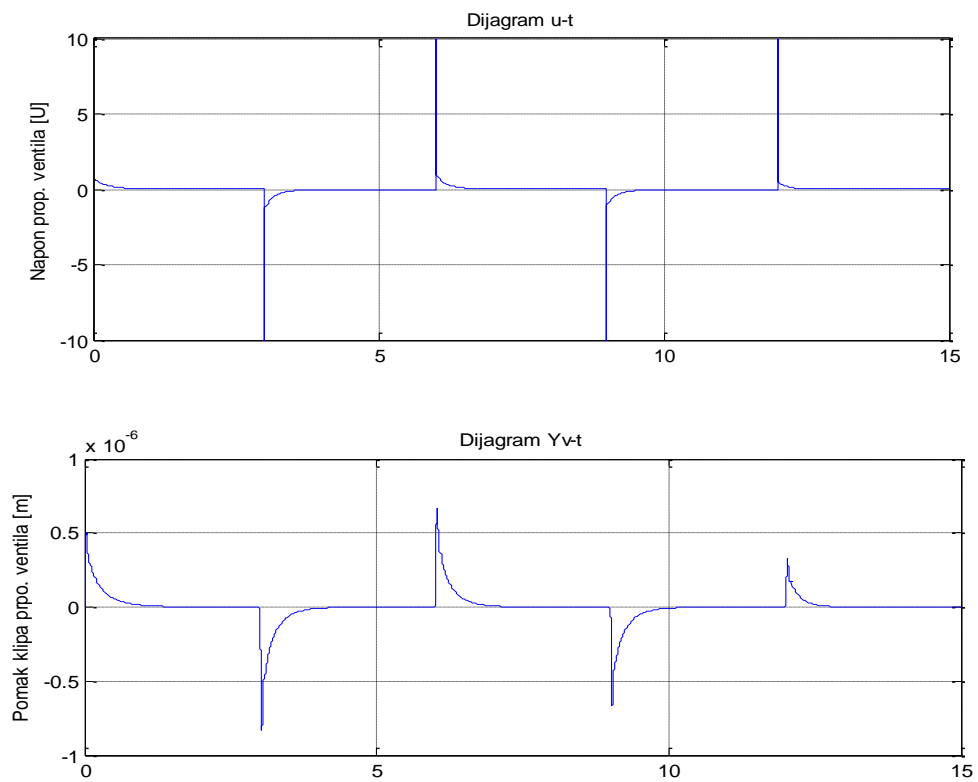
Slika 4.7 Vrijednosti parametara nelinearnog modela sustava

4.2 Simulacije izvedene standardnim PD regulatorom

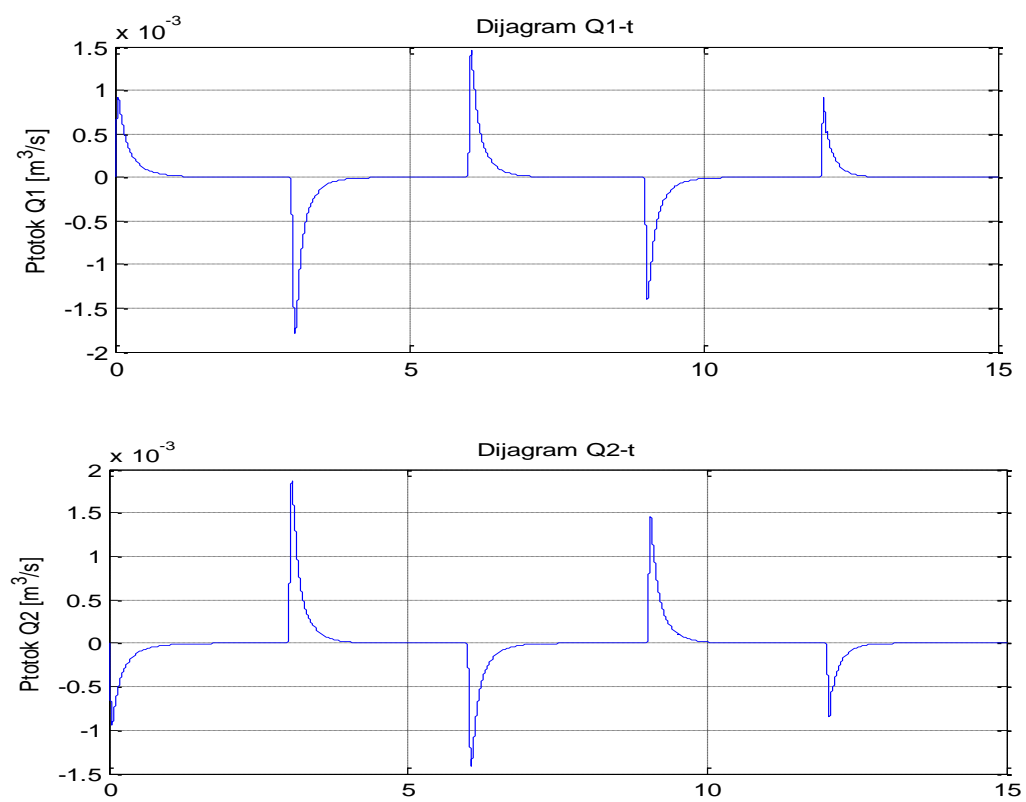
Iz dobivenih rezultata simulacije izvedene standardnim PD regulatorom možemo vidjeti da je ispunjen uvjet stabilnosti i točnosti, a brzina odziva je realna.



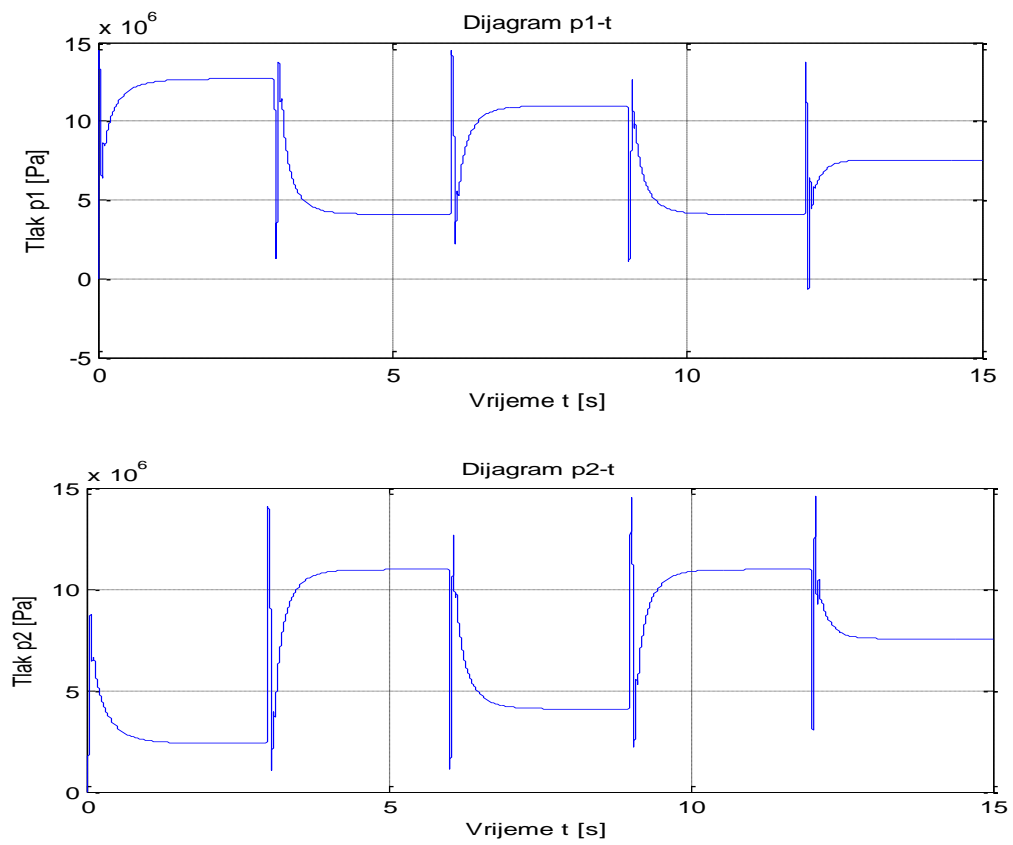
Slika 4.8 Pomak i brzina klipa cilindra u ovisnosti o vremenu



Slika 4.9 Pomak klipa proporcionalnog ventila i napon u ovisnosti o vremenu



Slika 4.10 Karakteristika protoka kroz proporcionalni ventil u ovisnosti o vremenu

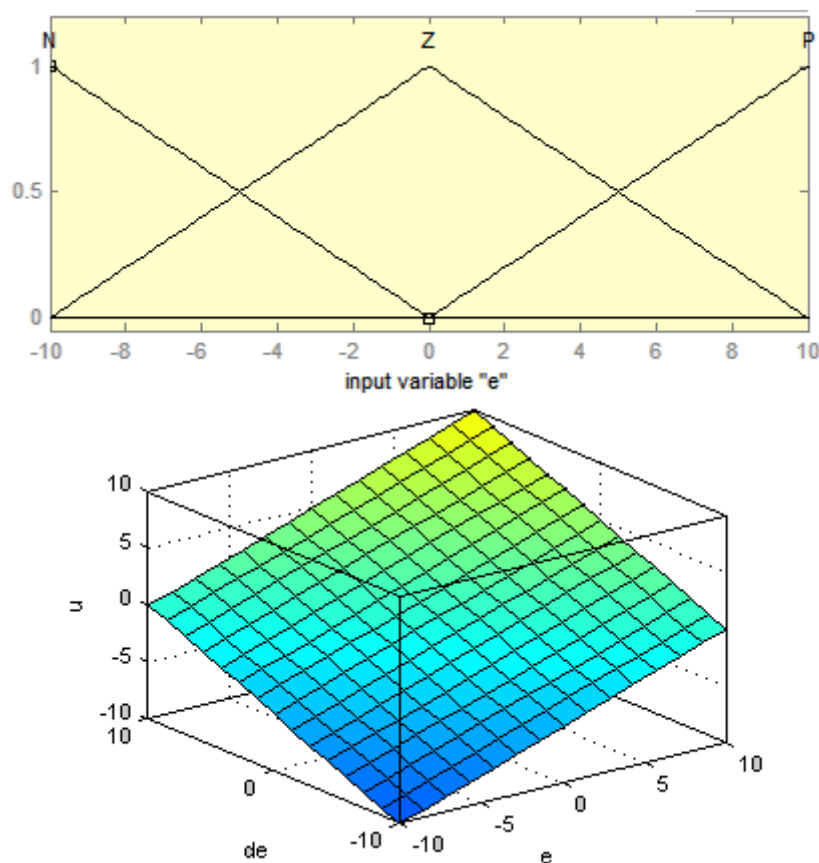


Slika 4.11 Karakteristika tlakova u ovisnosti o vremenu

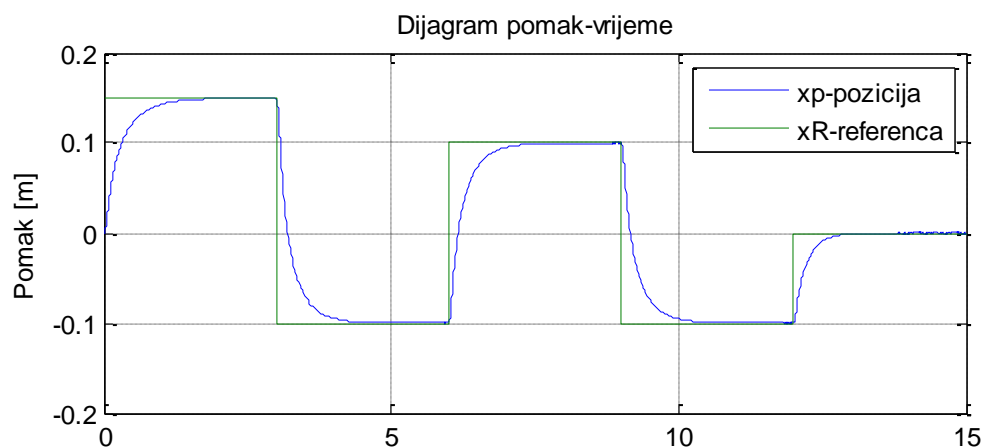
4.3 Simulacije izvedene neizrazitim regulatorima

Postoje dva osnovna tipa neizrazitih regulatora, a nazivaju se *Mamdani* i *Sugeno*. U neizrazitoj logici postoji veliki izbor operatora odlučivanja, no u regulacijskoj tehnici jedan on najčešće primjenjivanih je *Mamdanijev* minimum operator po kojemu je nazvan i sam regulator. *Mamdanijev* regulator osnovni je primjer neizrazitog regulatora, a osnovni neizraziti regulator detaljno je opisan u ovome poglavlju. Neizraziti regulator tipa *Sugeno*, često nazivan i *Takagi-Sugeno*, koristi drugačiju metodu neizrazitog zaključivanja. Kod ovog regulatora izostavlja se postupak *defuzzyfikacije* (izoštavanja) jer je rezultat svakog pravila već izrazita vrijednost. Izlaz regulatora dobiva se linearnom kombinacijom ulaznih varijabli, gdje svako pravilo definira jedan pomični *singleton*.

Linearni regulator tipa *Sugeno*:

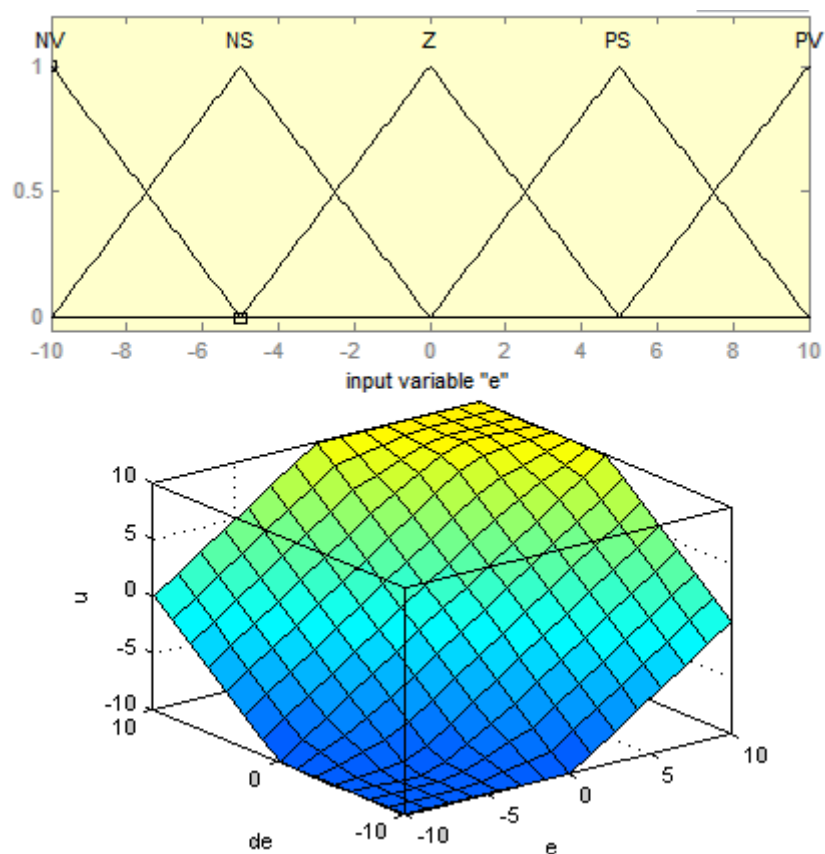


Slika 4.12 Funkcije pripadnosti i površina linearnog *Sugeno* regulatora

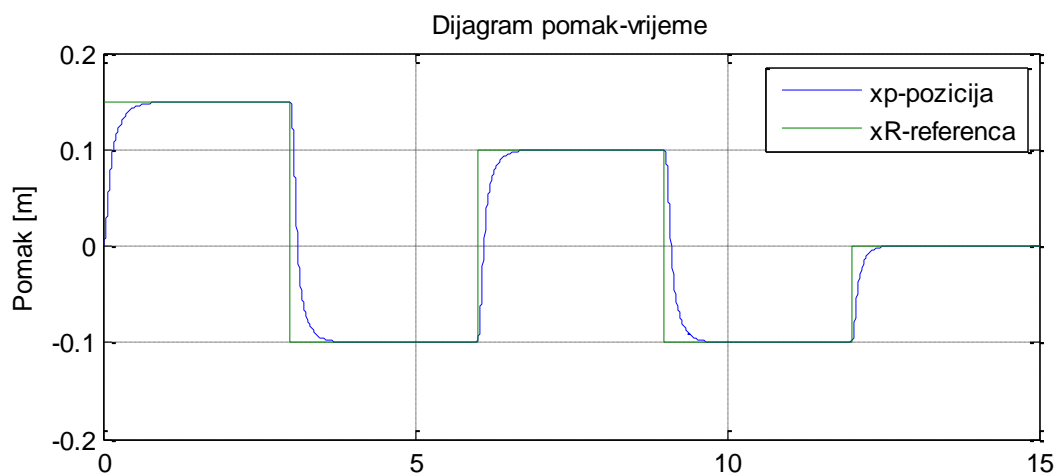


Slika 4.13 Dijagram pomak-vrijeme dobiven linearnim *Sugeno* regulatorom

Regulator tipa *Sugeno* s centrima funkcija pripadnosti [-10, -5, 0, 5, 10]:

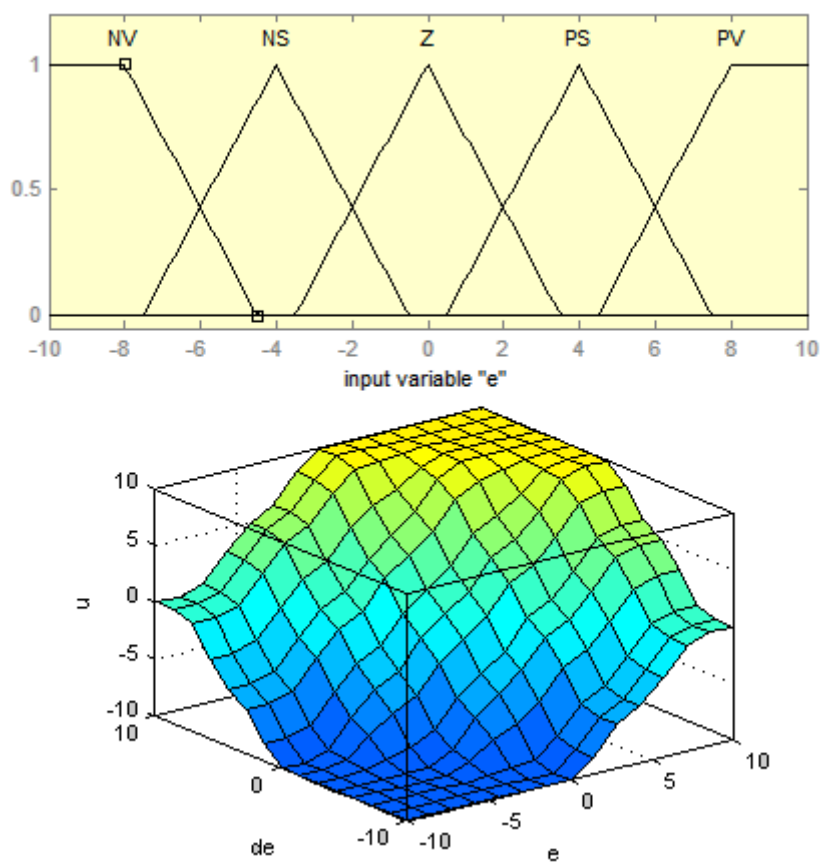


Slika 4.14 Funkcije pripadnosti i površina *Sugeno* regulatora

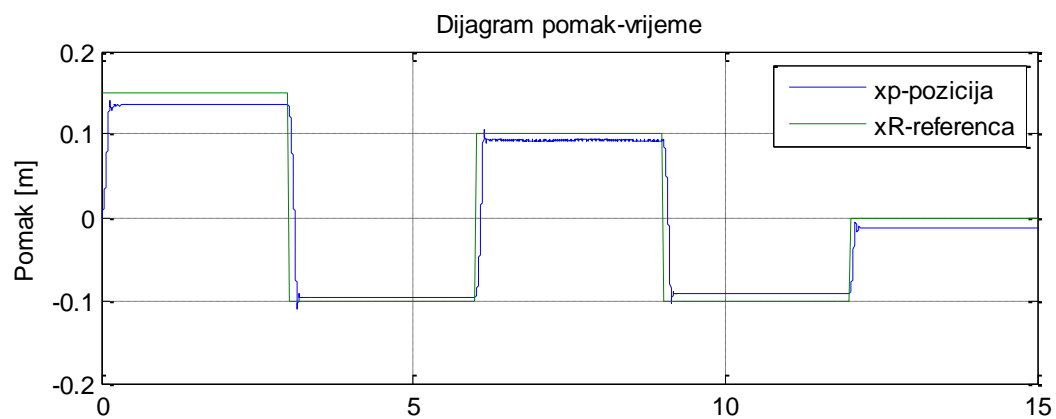


Slika 4.15 Dijagram pomak-vrijeme dobiven *Sugeno* regulatorom

Regulator tipa *Sugeno* s centrima funkcija pripadnosti [-8, -4, 0, 4, 8]:

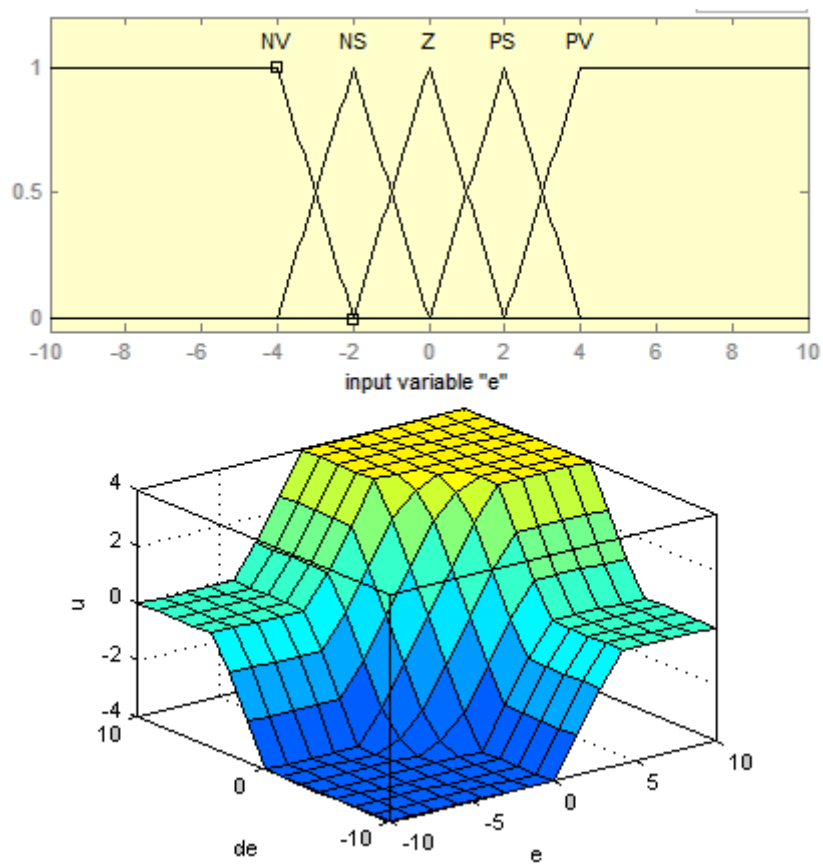


Slika 4.16 Funkcije pripadnosti i površina *Sugeno* regulatora

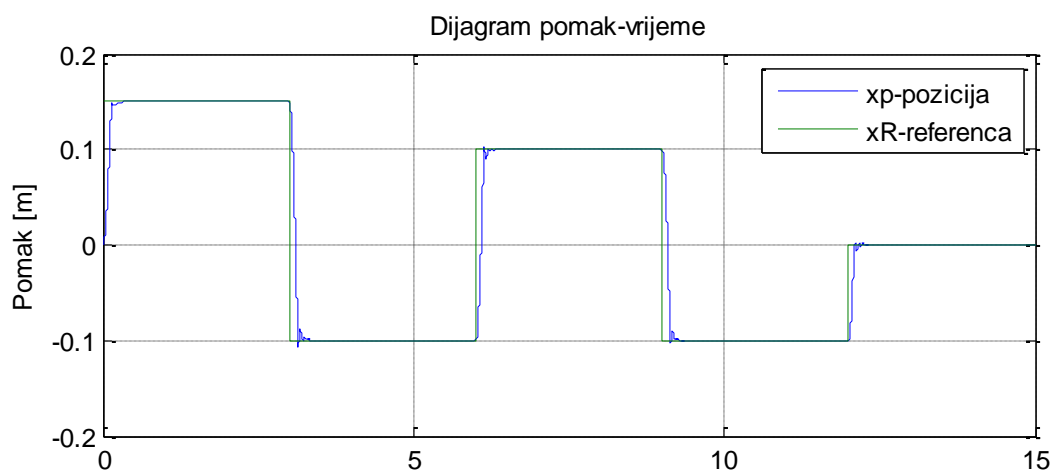


Slika 4.17 Dijagram pomak-vrijeme dobiven *Sugeno* regulatorom

Regulator tipa *Sugeno* s centrima funkcija pripadnosti [-4, -2, 0, 2, 4]:

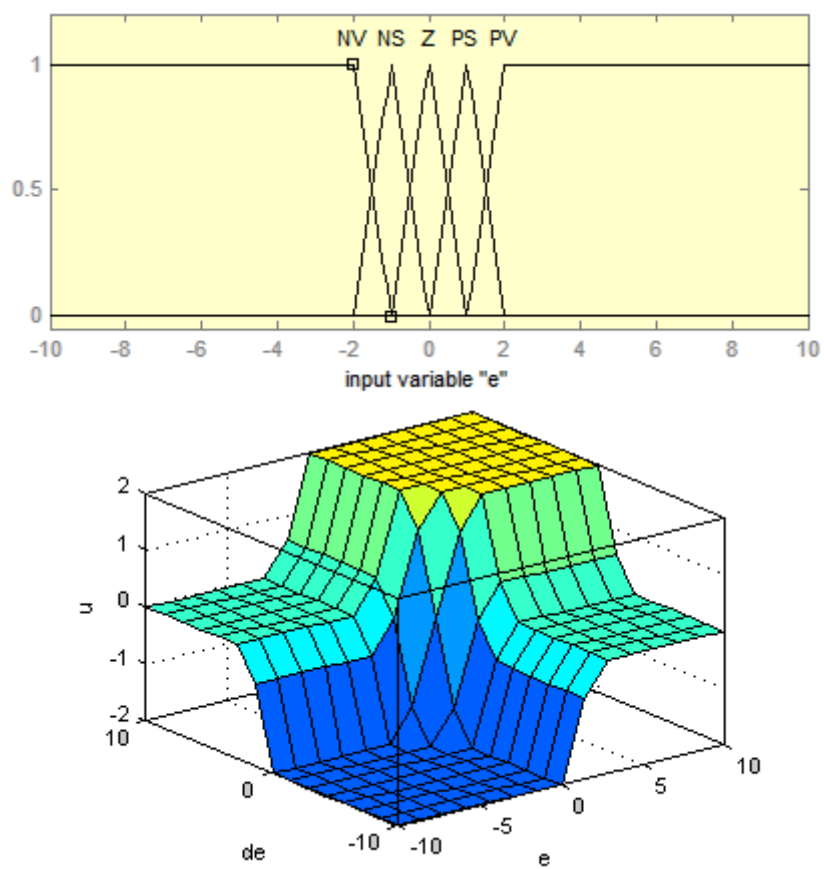


Slika 4.18 Funkcije pripadnosti i površina *Sugeno* regulatora

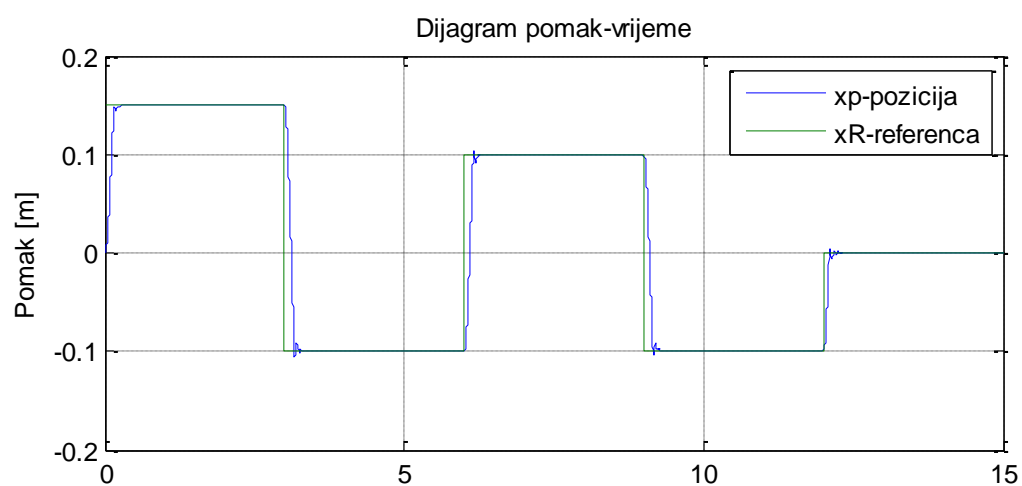


Slika 4.19 Dijagram pomak-vrijeme dobiven *Sugeno* regulatorom

Regulator tipa *Sugeno* s centrima funkcija pripadnosti [-2, -1, 0, 1, 2]:

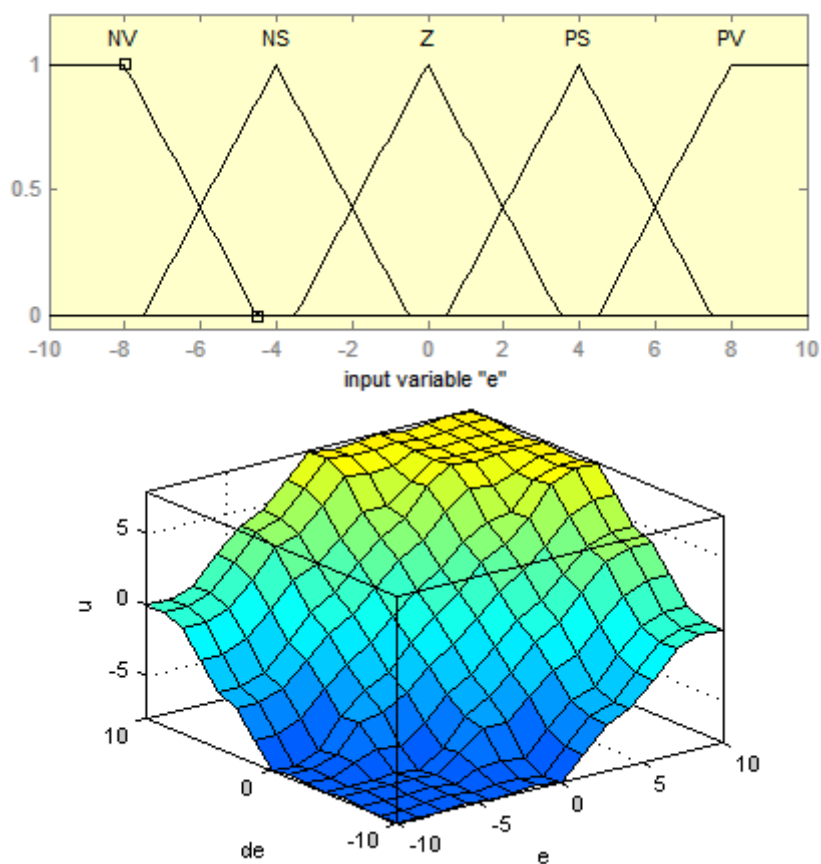


Slika 4.20 Funkcije pripadnosti i površina *Sugeno* regulatora

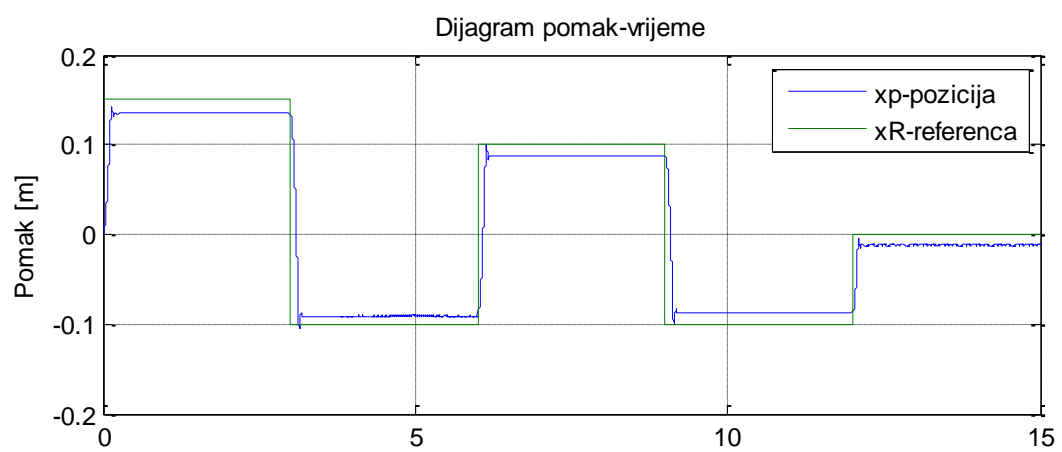


Slika 4.21 Dijagram pomak-vrijeme dobiven *Sugeno* regulatorom

Regulator tipa *Mamdani*:



Slika 4.22 Funkcije pripadnosti i površina *Mamdani* regulatora



Slika 4.23 Dijagram pomak-vrijeme dobiven *Mamdani* regulatorom

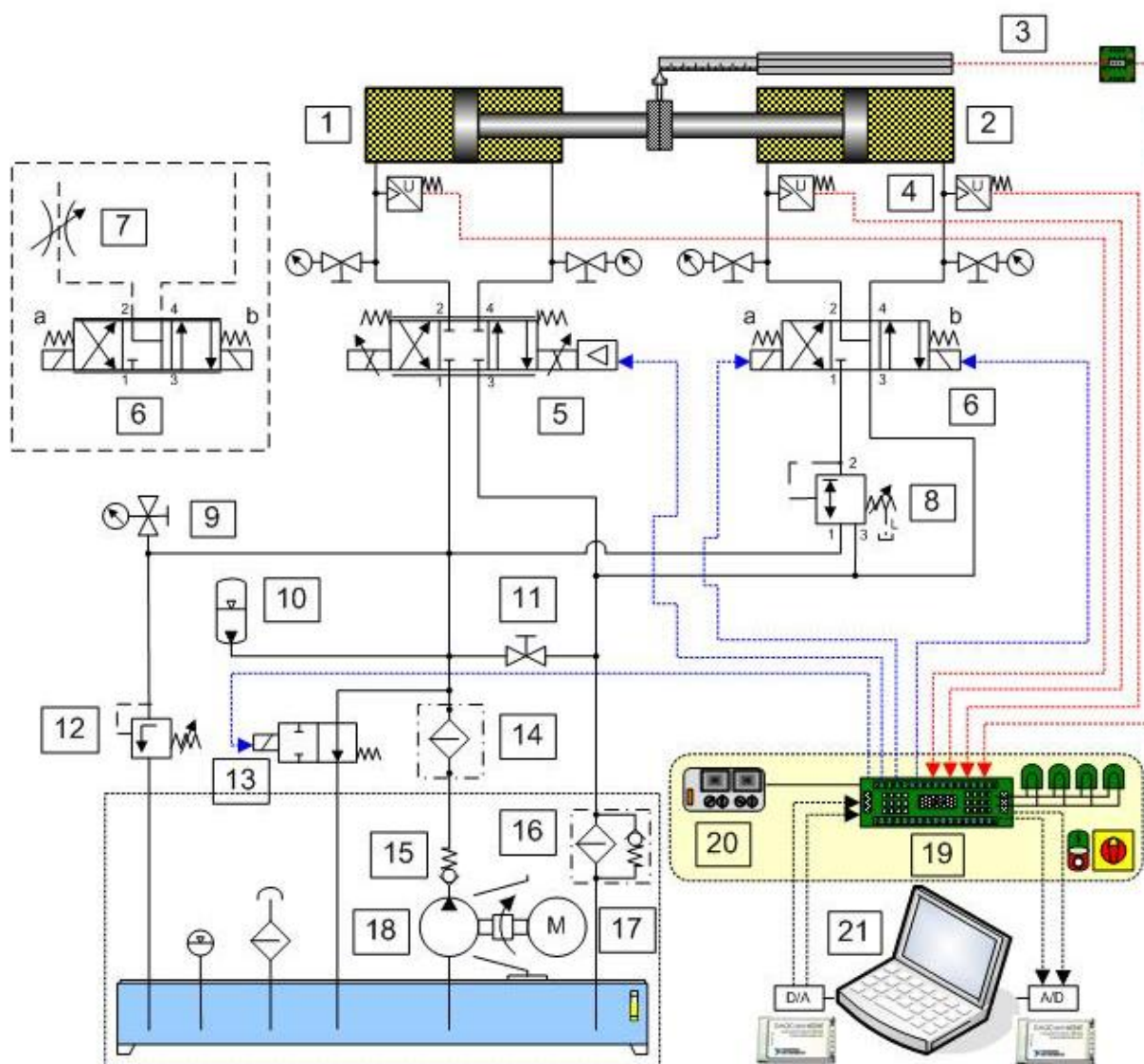
5 EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE

U ovome poglavlju opisan je eksperimentalni sustav na kojemu se vršilo ispitivanje, navedeni su njegovi dijelovi i prikazana je shema u programskom paketu Simulink pomoću koje se vršilo eksperimentalno ispitivanje. Također su predstavljeni rezultati regulacije elektrohidrauličkog servosustava dobiveni regulacijom klasičnog PD regulatora i nekoliko različitih neizrazitih regulatora. Rezultati eksperimentalnog ispitivanja također su dobiveni naredbama za crtanje grafova u programskom paketu Simulink. Ovo poglavlje predstavlja najvažniju stavku ovoga rada.

5.1 Opis eksperimentalnog uređaja

Eksperimentalni uređaj „HK-HA7“ proizvođača „HI-KON“ sastoji se od dva cilindra. Prvi cilindar čiju poziciju reguliramo u ovome slučaju upravljan je proporcionalnim ventilom, a drugi cilindar koji služi za simulaciju opterećenja prvog cilindra upravljan je elektromagnetskim razvodnikom. Na svakom cilindru postavljeni su senzori tlaka, tako da je moguće pratiti promjenu tlakova unutar cilindra tokom regulacije položaja. Upravljanje sustavom vrši se preko računala pomoću akvizicijske kartice koja je spojena sa upravljačkom kutijom sustava. Za mjerenje pozicije klipa cilindra koristi se linearni enkoder koji daje izlazni signal od 0V do 10V, ovisno o položaju. Navedeni elementi sustava ulaze u regulacijski krug i nazivaju se upravljačkim i upravljanim elementima sustava. Elementi koji se uzimaju kao sastavni dio regulacijskog kruga, a egzistiraju u sustavu su elementi hidrauličkog crpnog agregata. Hidraulički crpni agregat sastoji se od crpke, elektromotora, filtera, sigurnosnog ventila i spremnika sa pokazivačem razine i temperature hidrauličkog ulja.

Slika 5.1 prikazuje shemu eksperimentalnog uređaja na kojoj su numerički označene komponente.



Slika 5.1 Shema eksperimentalnog uređaja

Opis dijelova hidrauličkog sustava numeriranih na slici:

- 1 - pogonski cilindar, 2 - cilindar za terećenje, 3 - mjerni sustav, 4 - senzor tlaka,
- 5 - proporcionalni ventil, 6 - elektromagnetski ventil 4/3, 7 - prigušni ventil,
- 8 - tlačni regulacijski ventil, 9 - manometar, 10 - hidraulički akumulator,
- 11 - kuglasta slavina, 12 - sigurnosni ventil, 13 - rasteretni ventil, 14 - tlačni filter,
- 15 - nepovratni ventil, 16 - povratni filter, 17 - elektromotor, 18 - zupčasta crpka,
- 19 - električno sučelje, 20 - električni ispravljač, 21 - upravljačko računalo s akvizicijskom karticom.

5.2 Komponente eksperimentalnog uređaja

Slijedi popis komponenata eksperimentalnog uređaja HK-HA7, njihove karakteristike, te naziv proizvođača komponenata.

- **hidraulička crpka** (VIVOL, XV-P1 2.7)

$$n = 1380 \text{ [o/min]}$$

$$Q = 3,7 \text{ [l/min]}$$

$$p = 250 \text{ [bar]}$$

- **elektromotor** (KONČAR-MES, AZCD-0SB-4)

$$P = 1,1 \text{ [kW]}$$

$$n = 1380 \text{ [o/min]}$$

- **proporcionalni ventil** (REXROTH, 4WRAE6 E07-2X/G24K3/A1V)

direktno upravljani ventil s integriranom upravljačkom elektronikom

nominalna veličina = 6

maksimalni tlak = 315 [bar]

maksimalni protok = 42 [l/min]

upravljački signal = $\pm 10\text{V}$

- **cilindri** (HI-KON)

cilindar - čelična cijev Ø50 [mm]

klipnjača - tvrdo kromirana Ø36 [mm]

- **linearni enkoder** (FESTO)

rezolucija = 0,01 [mm]

maksimalna brzina gibanja = 5 [m/s]

maksimalno ubrzanje = 200 [m/s²]

hod = 300 [mm]

- **senzor tlaka** (SIEMENS)

mjerno područje = 0 - 250 [bar]

maksimalni tlak = 500 [bar]

napajanje = 15 - 36 [V]

- **filter** (REXROTH BOSCH GROUP, ABZFD)

veličina 63

maksimalna veličina čestica koje prolaze kroz filter = 3 [μm]

- **hidraulički akumulator** (Hydac)

maksimalni tlak = 140 [bar]

volumen = 1,4 [l]

- **upravljačka kutija** - sadrži sklopke, releje koji upravljaju elektromagnetskim razvodnicima, konektor na koji se spaja akvizicijska kartica (NATIONAL INSTRUMENTS)
- **ostale komponente**

elektrohidraulički razvodnici

sigurnosni ventili

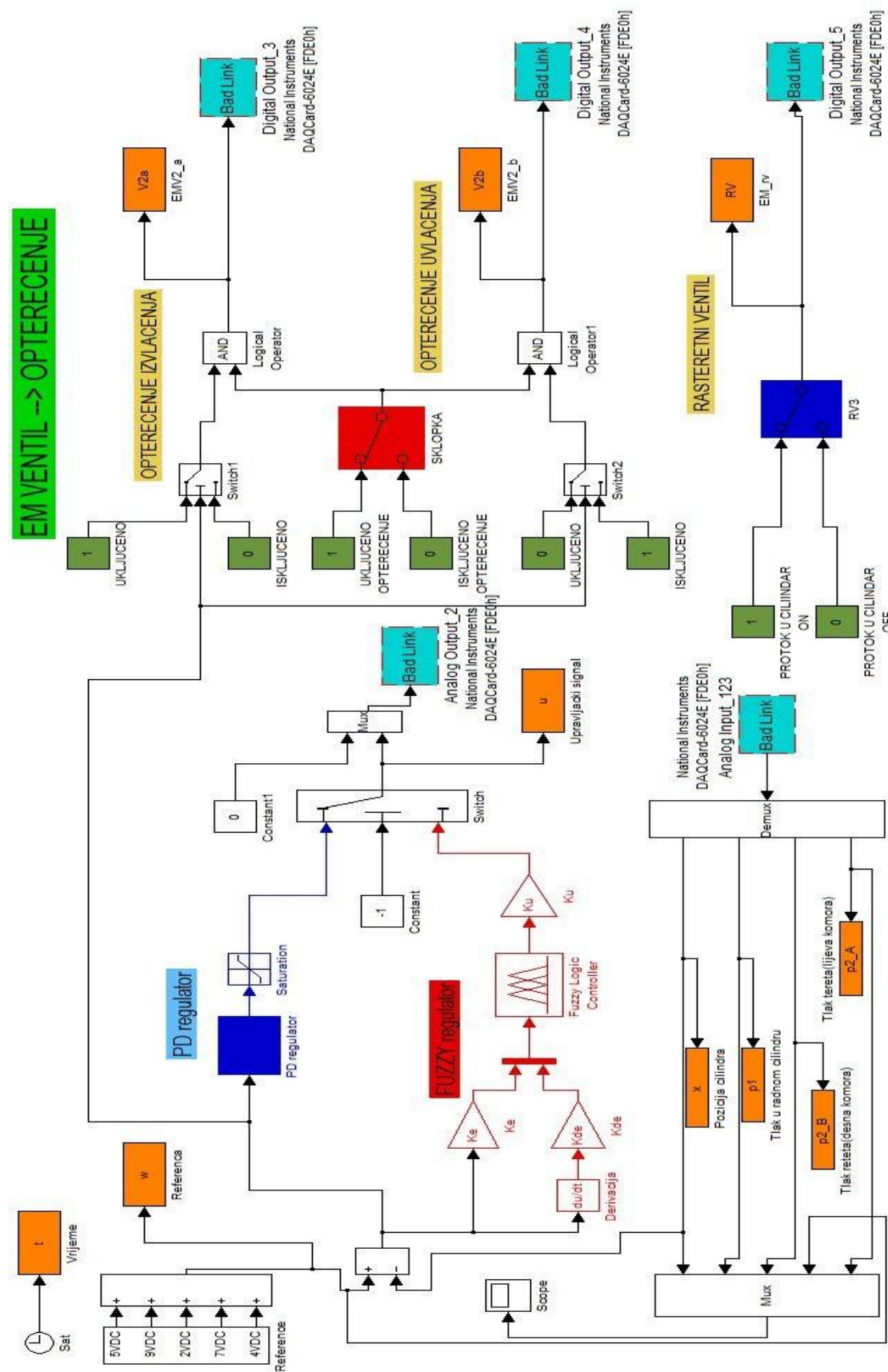
manometri

regulatori tlaka

hidrauličke cijevi

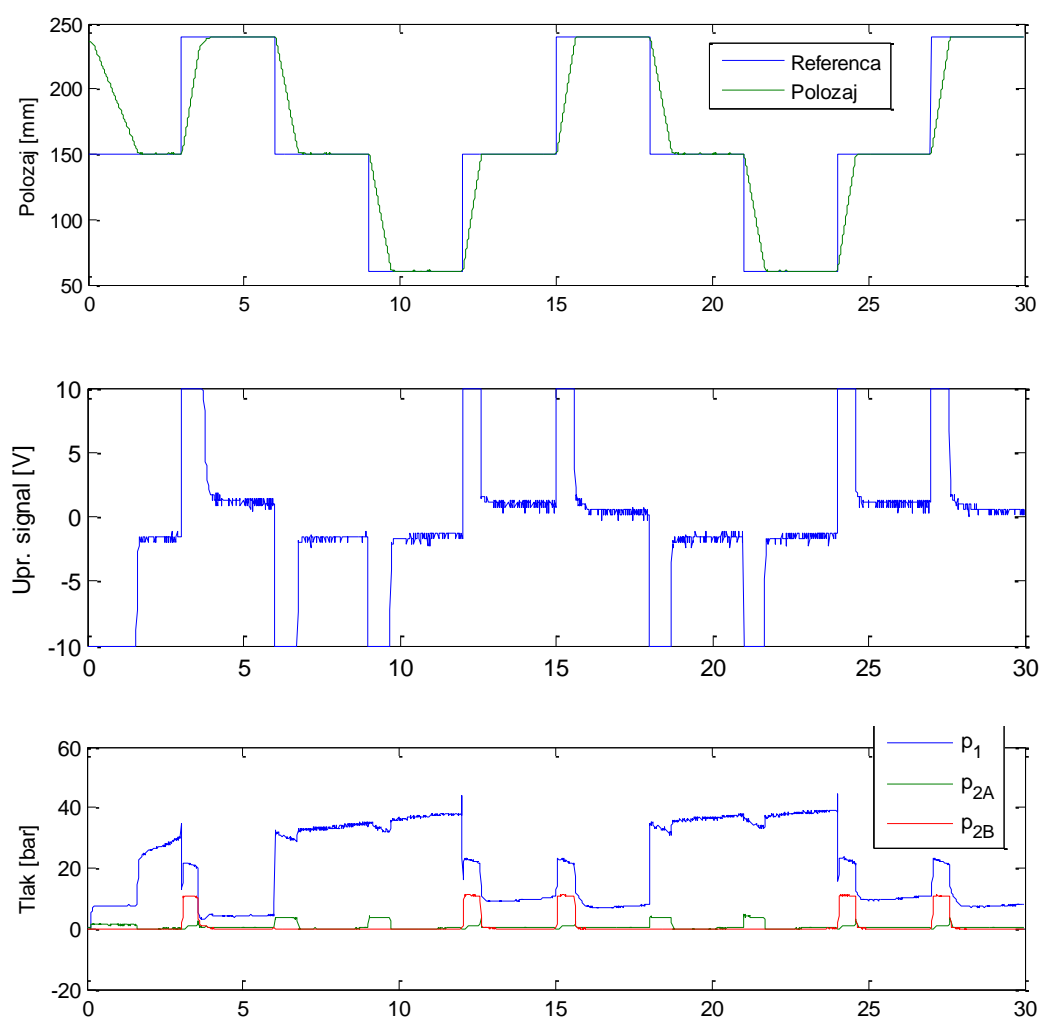
5.3 Rezultati eksperimentalnog ispitivanja

Ispitivanje se provodilo pomoću sheme, napravljene u programskom paketu Simulink, prikazane na slici 5.2. Pomoću sklopke moguće je mijenjati želimo li sustav regulirati klasičnim PD regulatorom ili neizrazitim regulatorom. Budući da smo na stvarnome sustavu zadali nove referentne vrijednosti ulaza, i da nije bilo moguće predvidjeti potpuno točan matematički model sustava, dolazi do promjene parametara regulatora. Najprije je regulacija sustava izvršena pomoću PD regulatora, a zatim sa više vrsta neizrazitog regulatora. Rezultati eksperimenata sa različitim tipovima regulatora biti će prikazani u ovome dijelu završnog rada. Iz rezultata se može vidjeti da neizraziti regulatori dobro vrše svoju zadaću, i ono što je bitno, nema nadvišenja. Iz rezultata se vidi da je odziv brz, uz malu pogrešku slijeđenja. Odzivi su nešto sporiji u slučaju kada je opterećenje uključeno, što je i očekivana posljedica budući da je opterećenje veliko i iznosi oko 1500 kg.



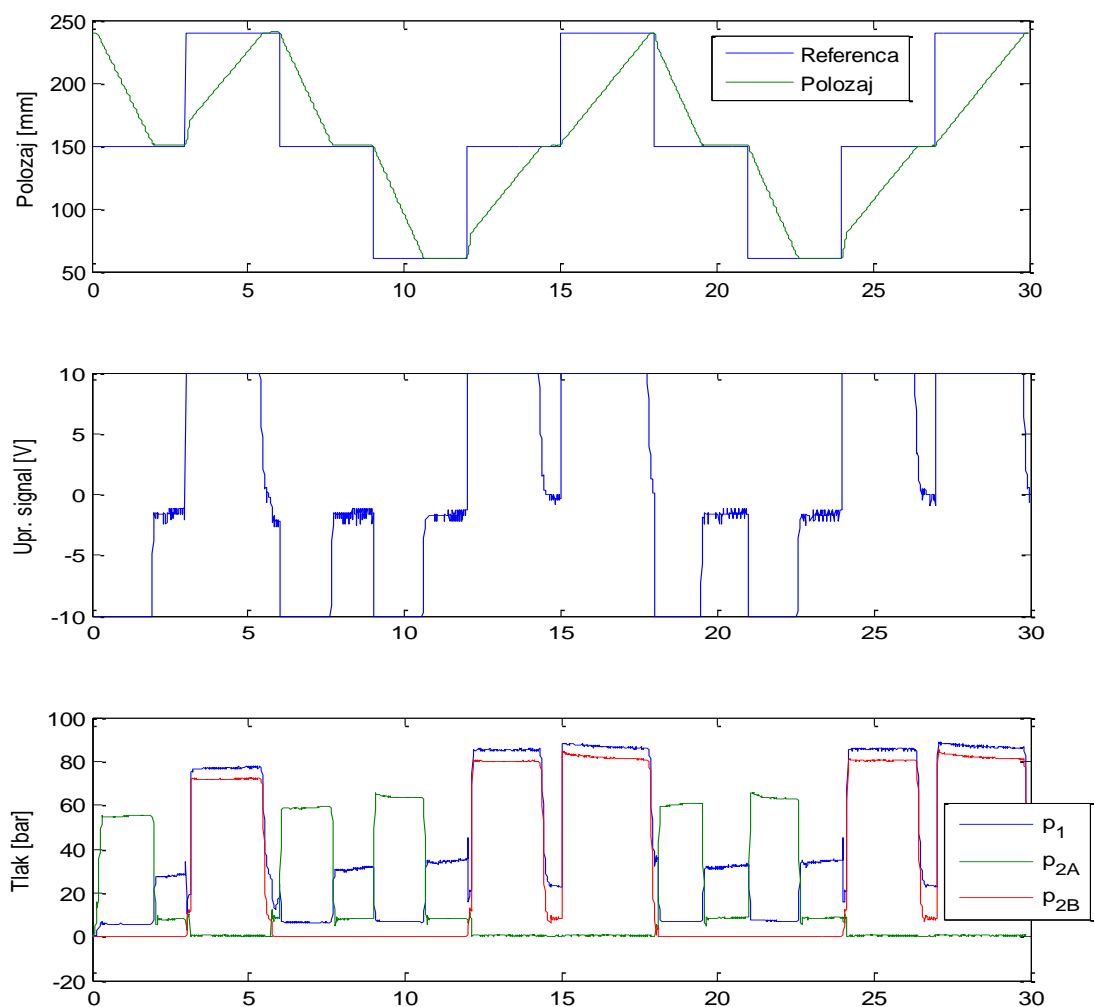
Slika 5.2 Simulink shema za eksperimentalno ispitivanje

Rezultati dobiveni klasičnim PD regulatorom:

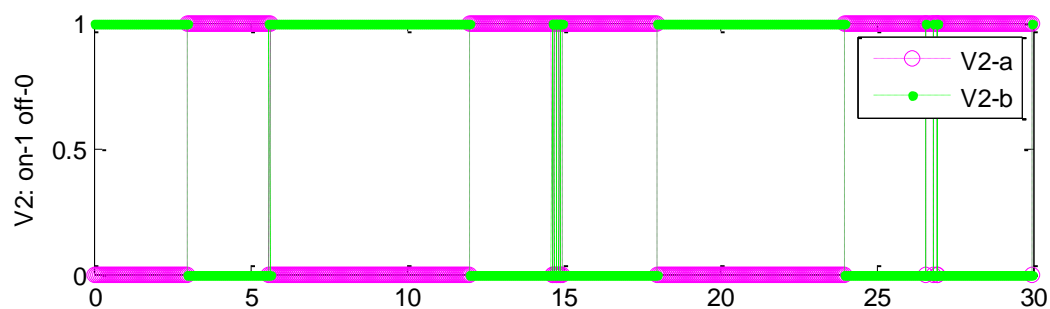


Slika 5.3 Dijagramski prikaz pomaka, tlaka i upravljačkog signala u ovisnosti o vremenu

Prikaz rezultata pri uključenom opterećenju:

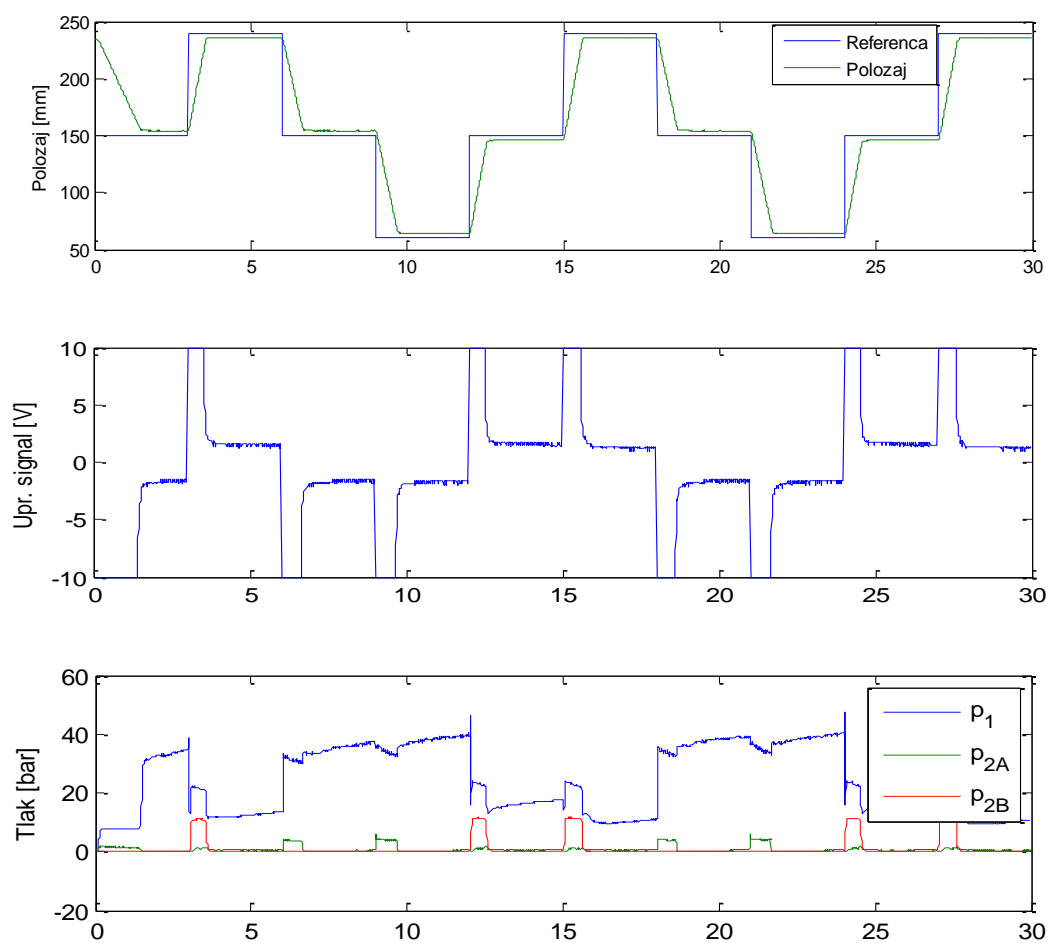


Slika 5.4 Dijagramski prikaz položaja, tlaka i upravljačkog signala u ovisnosti o vremenu



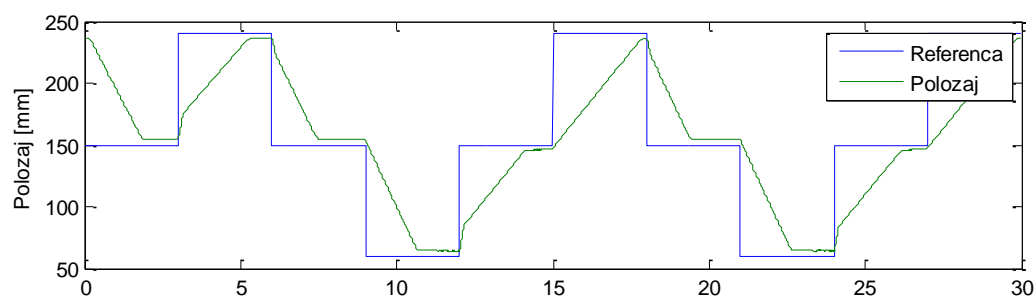
Slika 5.5 Dijagramski prikaz smjera opterećenja cilindra

Rezultati dobiveni regulatorom tipa *Sugeno* [-8, -4, 0, 4, 8]



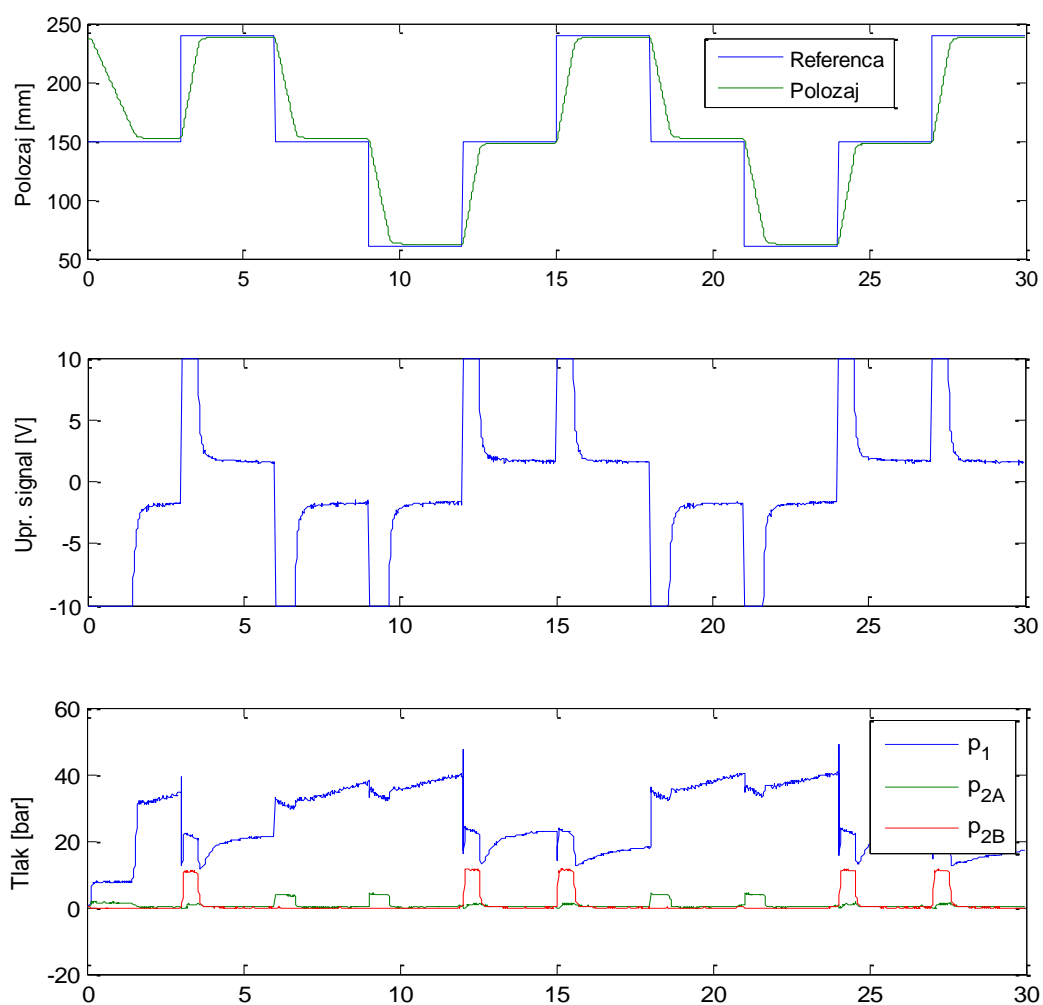
Slika 5.6 Dijagramski prikaz položaja, tlaka i upravljačkog signala u ovisnosti o vremenu

Kada je uključeno opterećenje:



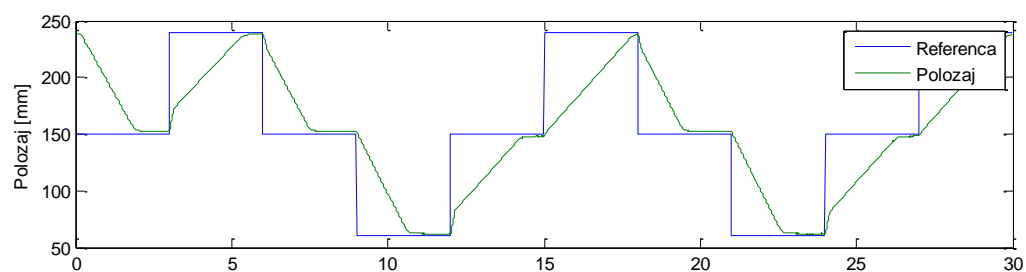
Slika 5.7 Dijagramski prikaz položaja u ovisnosti o vremenu

Rezultati dobiveni regulatorom tipa *Sugeno* [-4, -2, 0, 2, 4]



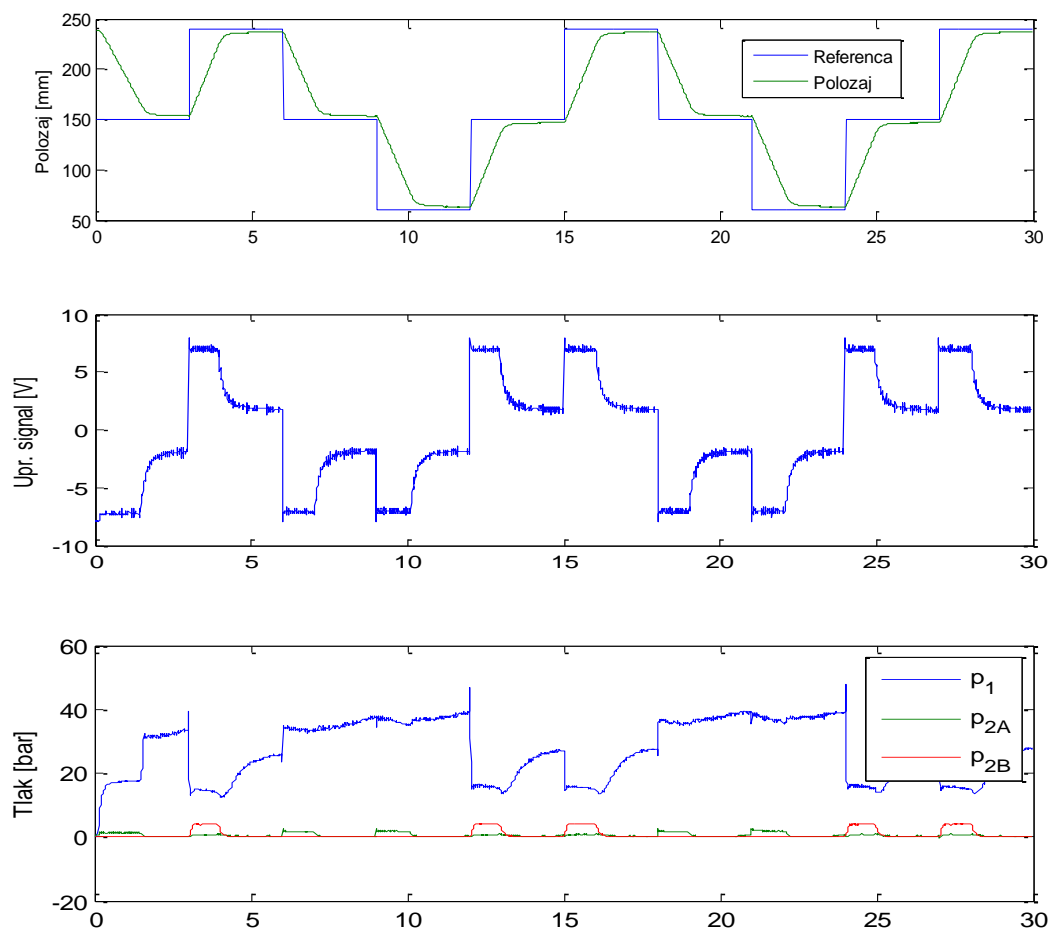
Slika 5.8 Dijagramski prikaz položaja, tlaka i upravljačkog signala u ovisnosti o vremenu

Kada je uključeno opterećenje:



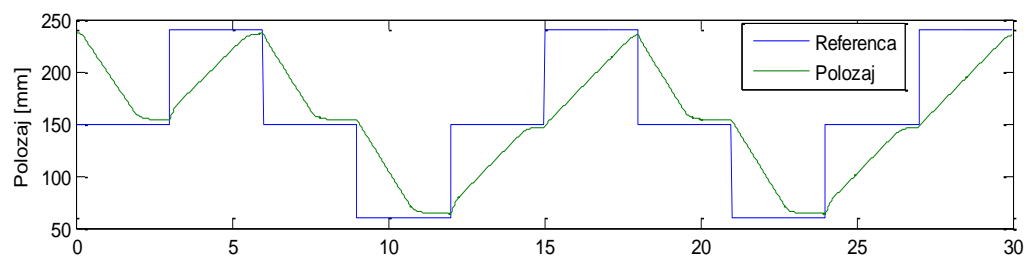
Slika 5.9 Dijagramski prikaz položaja u ovisnosti o vremenu

Rezultati dobiveni regulatorom tipa *Sugeno* [-2, -1, 0, 1, 2]



Slika 5.10 Dijagramski prikaz položaja, tlaka i upravljačkog signala u ovisnosti o vremenu

Kada je uključeno opterećenje:



Slika 5.11 Dijagramski prikaz položaja u ovisnosti o vremenu

6 ZAKLJUČAK

Cilj ovoga rada bio je projektirati neizraziti regulator koji bi trebao biti barem jednako dobar kao klasični PD regulator koji je primijenjen za regulaciju pozicije elektrohidrauličkog servosustava. Ono što je velika prednost neizrazitih regulatora je što nije potrebno prethodno znanje o geometrijskim, radnim te ostalim parametrima sustava koji se žele upravljati. Linearizirani matematički model elektrohidrauličkog servosustava izveden je uz mnogo pretpostavki, zanemarivanja veličina i pojava koje nemaju veći utjecaj na dinamičko ponašanje sustava, te kao takav predstavlja veliko pojednostavljenje u odnosu na realni sustav i zbog toga se za njega ne provodi sinteza neizrazitog PD regulatora. Neizraziti regulator vrlo je prilagodljiv. Izvršene su simulacije regulacije sustava u programskom paketu Simulink, najprije za klasični PD regulator, a zatim i za više tipova neizrazitih regulatora. Budući da su u simulacijama uvjeti idealni, dobiveni rezultati simulacija su upravo onakvi kakve smo očekivali. Brzina odziva sustava znatno se poboljšala, nema nadvišenja ni velikog odstupanja od referentne vrijednosti. Zaključeno je i da položaji centara funkcija pripadnosti i skalarni koeficijent dvije ulazne i jedne izlazne varijable neizrazitog regulatora imaju najveći utjecaj na dinamičko ponašanje sustava. Što su centri funkcija pripadnosti bili gušće postavljeni oko radne točke, a skalarni koeficijenti bili veći, odzivi sustava bili su točniji. Problem na koji se naišlo je broj funkcija pripadnosti kod projektiranja neizrazitog regulatora. Povećanjem funkcija pripadnosti sustav je sve brži i precizniji, ali se javlja problem nepreglednosti velikog niza pravila, kao i problem što računalu treba previše vremena da bi procesirao sva pravila tokom izvođenja simulacije. Iz tog razloga, većina simulacija napravljena je neizrazitim regulatorom sa dvadeset i pet pravila, odnosno pet funkcija pripadnosti. Problem kod sinteze neizrazitog regulatora je i nepostojanje univerzalne metode za podešavanje parametara neizrazitog regulatora, pa se podešavanje parametara temelji na iskustvu inženjera i metodi pokušaja i pogrešaka. Iz toga se da zaključiti da su neizraziti regulatori vrlo pogodni kada njima želimo zamijeniti klasične regulatore, a ukoliko se želi postići i bolje od toga, tada nema univerzalne metode već je potrebno uložiti dosta vremena i truda.

Nakon što je provedena simulacija, isti tipovi neizrazitih regulatora isprobani su i na eksperimentalnom modelu sustava „HK-HA7“, opisanog u ovome radu. Prvo je sustav reguliran klasičnim PD regulatorom, a zatim je regulacija provedena sa nekoliko tipova neizrazitih regulatora tipa *Sugeno*. Ono što je bitno, neizraziti regulatori pokazali su se vrlo

brzim i točnim, a nije bilo potrebno ulagati previše vremena da bi se pronašli parametri kao kod klasičnog PD regulatora.

U radu su se promatrali samo oni neizraziti regulatori koji zamjenjuj PD regulatore, odnosno neizraziti PD regulatori. Taj uvjet je zadovoljen, a ukoliko bi željeli poboljšati regulaciju sustava neizrazitim regulatorom, bilo bi dobro koristiti adaptivne neizrazite regulatore.

Adaptivni neizraziti regulatori tijekom rada automatski podešavaju svoje parametre prema trenutnim karakteristikama sustava. Također postoje i samoorganizirajući neizraziti regulatori, koji samostalno mijenjaju pravila u bazi pravila odlučivanja.

Literatura:

- [1] Cuglin P., Regulacija hidrauličkih sustava primjenom neizrazitog regulatora, Diplomski rad, FSB, 2009.
- [2] Cuglin P., Regulacija položaja elektrohidrauličkog sustava, Završni rad, FSB, 2008.
- [3] www.boschrexroth.com
- [4] Šurina T., Automatska regulacija, Školska knjiga, Zagreb, 1987.
- [5] Pommier V., i suradnici, Crone control of a nonlinear hydraulic actuator, Controle Engineering Practice 10, Vol 391-420, September 2001.
- [6] Džonlagić D., Osnove projektiranja neizrazitih (fuzzy) regulacijskih sustava, Ko-REMA, Zagreb, 1994.
- [7] Šitum Ž., Regulacija pneumatskog servosustava primjenom neizrazitog regulatora, doktorski rad, FSB, Zagreb, 2001.